

博士論文

慣性センサを用いた
3次元身体運動解析に関する研究

2014年

近藤 亜希子

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	4
1.3 参考文献	5
第2章 慣性センサを用いた身体運動計測における3次元姿勢推定法の構築	8
2.1 諸言	9
2.2 姿勢推定法	10
2.2.1 計測システム	10
2.2.2 初期姿勢推定	10
2.2.3 運動中の姿勢推定	12
2.3 計測実験	17
2.3.1 実験装置	17
2.3.2 実験結果（並進加速度なし）	18
2.3.3 実験結果（並進加速度あり）および考察	21
2.4 結言	23
2.5 参考文献	24
第3章 慣性センサを用いた実滑走におけるスキーヤーの3次元姿勢計測	26
3.1 諸言	27
3.2 計測システム	28
3.3 姿勢推定法	29
3.4 運動解析法	32
3.5 計測実験	35
3.5.1 実験方法	35
3.5.2 実験結果	36
3.6 結言	41
3.7 参考文献	42
第4章 慣性センサを用いたカービングターン，スキッピングターンの運動学的解析	44
4.1 諸言	45
4.2 計測システム	46
4.3 姿勢推定法	47

4.4	運動解析法	50
4.5	計測実験	53
4.5.1	実験方法	53
4.5.2	実験結果	54
4.6	結言	62
4.7	参考文献	63
第5章 慣性・力覚センサシステムを用いたカービングターン, スキップディング		
	ターンの運動力学解析	65
5.1	諸言	66
5.2	計測システム	67
5.3	運動解析法	68
5.3.1	姿勢推定法	68
5.3.2	運動力学解析法	69
5.4	計測実験	73
5.4.1	実験方法	73
5.4.2	実験結果	73
5.5	結言	82
5.6	参考文献	83
第6章 実滑走計測によるスキーヤーの下肢筋張力推定と運動解析		85
6.1	諸言	86
6.2	計測システム	87
6.2.1	運動計測システム	87
6.2.2	雪面反力計測システム	87
6.3	運動解析法	88
6.3.1	解析モデル	88
6.3.2	関節角度	89
6.3.3	関節トルク	90
6.3.4	筋張力推定	91
6.4	計測実験	92
6.4.1	実験方法	92
6.4.2	実験結果	93
6.4.3	解析・考察	98
6.5	結言	99
6.6	参考文献	100

第7章 結論	102
発表論文一覧	104
謝辞	108

第 1 章

序論

1.1 研究の背景と目的

スポーツの運動計測において、DLT法(Direct Linear Transformation method)⁽¹⁾が一般的に用いられている。DLT法は、複数のビデオカメラを用いて被験者に取り付けたマーカを撮影し、マーカの3次元位置情報を得る方法である。しかし、カメラとマーカの間には障害物がある場合には計測できない、計測範囲が広い運動を計測するためには、大規模なシステムが必要になり、高コストになる等の問題がある。そこで、低コストであり、簡易かつ計測範囲に制限されない計測が可能である慣性センサ(ジャイロセンサ、加速度センサ)を用いた運動計測法⁽²⁾⁽³⁾が提案されている。慣性センサは、近年、小型化・低価格化が著しく進んでおり、スポーツ工学、医療工学分野等、様々な分野で使用されている。しかし、慣性センサから得られる計測情報は加速度や角速度であり、身体運動計測において重要な情報である姿勢情報を直接計測することができない。ジャイロセンサから姿勢情報を算出するためには、角速度を積分演算する必要があるが、ジャイロセンサの出力に含まれるドリフト誤差が蓄積し、計測時間の経過とともに精度が低下する。また、加速度センサから姿勢を算出する場合には、方位情報が得られず、加速度センサが検出する動的加速度(並進加速度、遠心・接線加速度)が誤差となる。従って、身体運動の解析において用いられる運動学的解析や動力的解析には、姿勢情報が必要であるため、慣性センサから正確な姿勢情報を得る方法の構築が必要である。

そこで、ジャイロセンサのドリフトによる誤差を補正する方法として、複数のセンサを用いて誤差を補正するセンサ・フュージョンが提案されており、2軸ジャイロセンサ、2軸加速度センサからロール角、ピッチ角を推定する方法⁽⁴⁾、3軸ジャイロセンサ、3軸加速度センサ、2軸地磁気センサからロール・ピッチ・ヨー角を推定する方法⁽⁵⁾、3軸ジャイロセンサ、3軸加速度センサ、3軸地磁気センサからロール・ピッチ・ヨー角を推定する方法⁽⁶⁾、クォータニオンを推定する方法⁽⁷⁾等が提案されている。しかし、これらのセンサ・フュージョンはスポーツの運動計測を行うことを目的としたものではなく、動的加速度が大きいスポーツの運動計測を行う場合には、精度が低下する。廣瀬らは、慣性センサ、地磁気センサを搭載した計測システムを用いたセンサ・フュージョンの提案を行っており、動的加速度による影響を低減した姿勢情報を推定するセンサ・フュージョンの構築・スキーヤーへの適用⁽⁸⁾、遠心・接線加速度成分の影響に対応したセンサ・フュージョンの構築⁽⁹⁾を行って

いるが、並進加速度が大きくなる運動においては十分な精度を得ることは難しい。加えて、これらの方法は、方位角成分の誤差を補正するために、地磁気センサから得られる磁場を用いており、磁場発生源や金属等による磁場外乱の影響を受ける環境下においては、誤差が発生する。Roetenberg らによって局所的な磁場外乱に対応可能な方法⁽¹⁰⁾が提案されているが、定常的な磁場外乱が発生している環境下においては、磁場を正確に計測できない。地磁気センサを用いず、加速度センサのみを用いたドリフト誤差の補正法として、疑似慣性座標系を用いた膝関節角度計測法⁽¹¹⁾が提案されており、この方法は膝関節のような 1 自由度関節において有効な方法であるが、3 自由度関節には対応していない。

以上より、動的加速度や磁場外乱による影響を受けず、ジャイロセンサのドリフト誤差を 3 次元で補正する方法の構築が必要である。本論文では、相対座標系の運動情報に着目し、加速度センサのみの情報を用いてジャイロセンサのドリフト誤差を 3 次元的に補正した姿勢情報を推定する方法を提案する。本方法は、並進加速度による影響を考慮しており、地磁気センサを使用しないことから磁場外乱による影響もないため、動的加速度や磁場外乱の発生する環境下における身体運動計測への応用が期待できる。

さらに、本論文では、構築した 3 次元姿勢推定法をスキー・ターンの運動解析へ展開し、スキーヤーの 3 次元身体運動解析を行う。

スキーは幅広い年齢に親しまれているスポーツであり、スキーに関する研究は、様々な分野において行われている。アルペンスキー競技における技術の質的発展構造と技能レベル区分に関する研究⁽¹²⁾等の体育学分野における研究、スキー振興調査に関する研究⁽¹³⁾、スキー講習会の調査に関する研究⁽¹⁴⁾等の歴史学分野における研究、スキー選手の障害に関する研究⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾や怪我の予防に関する研究⁽¹⁷⁾等の医学分野における研究が行われている。工学分野においては、スキー板の滑走面における圧力分布計測⁽¹⁸⁾、スキーロボットの開発⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾、スキー用筋電計測装置の開発⁽²¹⁾⁽²²⁾、クロスカントリースキーにおけるポール技術評価⁽²³⁾、2次元の力情報を計測するバイディングシステムの開発⁽²⁴⁾等が行われている。しかし、スキーは広大な範囲の雪面を高速で滑走するスポーツであることから、DLT 法を適用することが難しいため、実滑走におけるスキーヤーの身体運動計測に関する研究はほとんど行われていない。そのため、スキー競技の指導現場においては、指導者の経験や感覚に依存したスキル評価、指導を行っているのが現状である。しかし、定量的なスキル評価や客観的な指導を行うためには、スキーヤーの運動を定量的に示し、スキー・ターンのメカニズムを解明することが必要不可欠である。スキーヤーの身体運動計測に関する研究として、実滑走におけるスキーヤーの姿勢情報、滑走軌跡、滑走速度計測に関する研究⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾が行われているが、これらの研究では比較的ゆっくりしたターンの運動解析を行っており、動的加速度の大きい高速なターンの運動解析を行う場合には、精度が低下する可能性がある。

以上より、並進加速度が大きい場合にも 3 次元姿勢情報を推定可能である、本研究で構築した方法をスキー・ターンの運動解析へ展開し、スキーヤーの 3 次元身体運動解析を行うことにより、これまでは計測できなかった高速なターンの身体運動解析を行う。

慣性センサを用いた 3 次元姿勢推定法の構築と、本方法を用いた実滑走におけるスキーヤーの運動学的解析，動力学的解析，生体運動解析について，以下に示す．

1. 慣性センサを用いた身体運動計測における 3 次元姿勢推定法の構築
2. 慣性センサを用いた実滑走におけるスキーヤーの 3 次元姿勢計測
3. 慣性センサを用いたカービングターン，スキッディングターンの運動学的解析
4. 慣性・力覚センサシステムを用いたカービングターン，スキッディングターンの運動力学解析
5. 実滑走計測によるスキーヤーの下肢筋張力推定と運動解析

1. 「慣性センサを用いた身体運動計測における 3 次元姿勢推定法の構築」では，動的加速度，磁場外乱の影響を受けずに，慣性センサのみから得られる情報を用いてジャイロセンサのドリフトによる誤差を補正した 3 次元姿勢情報を推定する新しい方法を提案する．また，並進加速度，磁場外乱が発生する環境下における検証実験を行うことにより，本推定法の有効性を示す．

2. 「慣性センサを用いた実滑走におけるスキーヤーの 3 次元姿勢計測」では，慣性センサを取り付けたスキーヤーによる計測実験を行い，構築した 3 次元姿勢推定法を適用することにより，実滑走におけるスキーヤーの運動計測を行う．本方法は並進加速度による影響を受けないことから，これまでの方法では計測できなかった高速なターンの運動を計測可能であることを示す．

3. 「慣性センサを用いたカービングターン，スキッディングターンの運動学的解析」では，カービングターン，スキッディングターンを行うスキーヤーの計測実験と 3 次元姿勢推定法の適用を行う．さらに，異なる種類のターンにおける 1 ターン（左ターン→右ターン）分の運動に着目し，ターン種類の違いによる運動の違いを示す．

4. 「慣性・力覚センサシステムを用いたカービングターン，スキッディングターンの運動力学解析」では，慣性センサを用いた運動計測システムと力センサを用いた雪面反力計測システムを併用した動力学的解析法を構築し，スキーヤーの運動情報への適用を行う．また，ターン中の力情報に着目した解析を行う．

5. 「実滑走計測によるスキーヤーの下肢筋張力推定と運動解析」では，スキーヤーの生体内部の筋情報に着目し，スキーヤーの実滑走情報に 3 次元筋骨格モデルを適用することによって下肢筋張力推定を行う．また，下肢筋張力の変化に着目した解析を行い，ターンを行うために重要な筋情報を示す．

1.2 本論文の構成

- [第1章] 序論では、本論文の背景と目的および構成について述べる。
- [第2章] 第2章では、慣性センサを用いた3次元姿勢推定法の構築と、精度検証を行った結果について述べる。
- [第3章] 第3章では、慣性センサを取り付けたスキーヤーによるカービングターンの計測実験を行い、構築した3次元姿勢推定法を適用することにより得られた結果について述べる。
- [第4章] 第4章では、異なる種類のターンにおけるスキーヤーの運動の違いを示すため、カービングターン、スキップディングターンを行うスキーヤーの計測実験と、3次元姿勢推定法の適用を行い、運動学的解析を行った結果について述べる。
- [第5章] 第5章では、慣性センサを用いた運動計測システムと6軸力センサを用いた雪面反力計測システムを併用した動学的解析法の構築と、スキーヤーの運動情報への適用を行い、ターン中にスキーヤーが発揮した力に着目した解析を行った結果について述べる。
- [第6章] 第6章では、スキーヤーの実滑走情報に3次元筋骨格モデルを適用することによって下肢筋張力推定を行い、下肢筋張力の変化に着目した解析を行った結果について述べる。
- [第7章] 結論では、本論文の第2章から6章までの総括を行う。

1.3 参考文献

- (1) 池上康男, 桜井信二, 矢部京之助, DLT 法, *Japan Journal of Sport Science*, 第 10 巻第 3 号, 191 頁~195 頁 (1991).
- (2) 穂苅真樹, 渡辺嘉二郎, 栗原陽介, 瀬川友輔, 鳴尾丈司, スポーツフォームの運動解析と計測 : ゴルフドライバースイングフォームの計測, 計測自動制御学会論文集, 第 38 巻第 11 号, 922 頁~930 頁 (2002).
- (3) 古瀬則夫, 渡邊高志, 星宮望, 圧電式ジャイロスコープを用いた下肢関節角度の簡易計測法, 生体医工学 : 日本エム・イー学会誌, 第 43 巻第 4 号, 538 頁~543 頁 (2005).
- (4) Foxlin, E., Inertial Head-Tracker Sensor Fusion by a Complementary Separate-Bias Kalman Filter, *IEEE Proceedings of VRAIS'96*, pp.185-194 (1996).
- (5) Vahanay, J., and Aldon, J.M., A. Fournier Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data, *Proceedings of the IEEE international conference on Robotics and Automation 1993*, pp.277-282 (1993).
- (6) Jurman, D., Jankovec, M., Kamnik, R., and Topic, M., Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system, *Sensors and Actuators A*, Vol. 138, pp.411-420 (2007).
- (7) Sabatini, M.A., Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 53, No. 7, pp.1346-1356 (2006).
- (8) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 永作清, 拡張カルマンフィルタを用いたスキー・ターンの運動計測と力学解析に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 第 77 巻第 774 号, 470 頁~480 頁 (2011).
- (9) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, 慣性センサ・地磁気センサを用いたスポーツにおける姿勢計測に関する研究, *スポーツ産業学研究*, 第 22 巻第 2 号, 255 頁~262 頁 (2012).

- (10) Roetenberg, D., Luinge, H., Baten, C., and Veltink, P., Compensation of Magnetic Disturbances Improves Inertial and Magnetic Sensing of Human Body Segment Orientation, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 13 No. 3, pp.395-405 (2005).
- (11) Cooper, G., Sheret, I., McMillian, L., Silverdis, K., Sha, N., Hodgins, D., Kenney, L. and Howard, D., Inertial sensor-based knee flexion/extension angle estimation, *Journal of Biomechanics*, Vol. 42, pp.2678-2685 (2009).
- (12) 近藤雄一郎, 竹田唯史, 川口城二, アルペンスキー競技大回転種目における技術の質的発展構造と技能レベル区分について, *スキー研究*, 第9巻第1号, 1頁～24頁(2012).
- (13) 新井博, 1940年幻の札幌冬季オリンピックに向けてのスキー振興 —1928～35年全日本スキー連盟の活動を中心に—, *スキー研究*, 第10巻第1号, 35頁～45頁(2013).
- (14) 中浦皓至, 高田における明治・大正時代のスキー講習会とその受講者, *スキー研究*, 第7巻第1号, 35頁～46頁(2011).
- (15) 佐藤照友旭, 土屋陽祐, 櫻庭景植, 相原博之, 武藤芳照, 越智英輔, 高校スキー選手の外傷・障害調査, *日本スキー学会誌*, 第23巻1号, 45頁～48頁(2013).
- (16) 浅井泰詞, 阿部久貴, 北徹朗, スキー専用スキー場における傷害傾向, *日本スキー学会誌*, 第23巻1号, 49頁～52頁(2013).
- (17) Senner, V., Michel, I. F., Lehner, S., Brugger, O., Technical possibilities for optimising the ski-binding-boot functional unit to reduce knee injuries in recreational alpine skiing, *Sports Engineering*, Vol.16, No.4, pp.211-228 (2013).
- (18) Nilsson, J., Karlof, L., Jakobsen, V., A new device for measuring ski running surface force and pressure profiles, *Sports Engineering*, Vol.16, No.4, pp.55-59 (2013)
- (19) 清水史郎, 長谷川健二, テレマークスキーロボットの開発～股関節の屈曲と伸展および股関節の内旋によるプルークターンモデル～, *スキー研究*, 第6巻第1号, 9頁～14頁(2009).

- (20) 清水史郎, 長谷川健二, テレマークスキーロボットの開発～股関節の屈曲と伸展によるパラレルターンモデル～, スキー研究, 第7巻第1号, 21頁～26頁 (2010) .
- (21) 塩野谷明, 畠圭祐, 西條暁里, 今村啓, 山本晋平, 実滑走時のスキー振動とヒト EMG の同時計測システムの構築, 日本スキー学会誌, 第20巻第1号, 83頁～90頁 (2010).
- (22) 塩野谷明, 監物勇介, 西條暁里, スキー実滑走中の機械力学振動およびヒト EMG (Electromyography) の同時計測システムによるスキー板の振動とヒト EMG の相互相関分析の試み, スキー研究, 第10巻第1号, 1頁～11頁, (2013).
- (23) Swaren, M., Therell, M., Eriksson, A., Holmberg, A. C., Testing method for objective evaluation of cross-country ski poles, Sports Engineering, Vol.16, No.4, pp.255-264 (2013).
- (24) Othonen, O., Lindinger, S., Lemmettyla, T., Seppala, S., Linnamo, V., Validation of portable 2D force binding systems for cross-country skiing, Sports Engineering, Vol.16, No.4, pp.281-296 (2013).
- (25) 土岐仁, 穂苺真樹, 小林義隆, スキー滑走フォームの運動解析と計測に関する研究, 日本機械学会 Dynamic & Design Conference 2005, 515-1頁～515-5頁 (2005).
- (26) 廣瀬圭, 土岐仁, 佐藤伸幸, 村田浩, スキーヤーの姿勢・滑走軌跡を用いたスキー・ターンの運動解析に関する研究, スキー研究, 第8巻第1号, 21頁～27頁 (2011).
- (27) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, スキーヤーの関節角度・滑走速度計測によるスキー・ターンの運動解析に関する研究, スポーツ産業学研究, 第22巻第1号, 1頁～8頁 (2012).

第 2 章

慣性センサを用いた身体運動計測における 3次元姿勢推定法の構築

The purpose of this study is to propose the measurement method of 3D posture using inertial sensors. The proposed method estimates the 3D posture (Roll-Pitch-Yaw angles in local coordinate) using the 3-axis angular velocity and the 3-axis acceleration. The 3D posture is compensated for the drift error of gyro sensor output by the translational and gravity accelerations of accelerometer output. The nonlinear state equation and the nonlinear measurement equation were established to estimate 3D posture. The Extended Kalman filter and the Unscented Kalman filter are applied to these equations. The measurement experiment was conducted to clarify the accuracy of proposed method using the experimental setup installing the rotary encoders. The results of the Unscented Kalman filter indicated higher than those by the Extended Kalman filter. In addition, the proposed method estimated the 3D posture compensating the drift error of gyro sensor in the measurement experiment generating the translational acceleration. Therefore, the proposed method can be used for the measurement of body motion.

2.1 諸言

近年の MEMS 技術(Micro Electro Mechanical Systems Technology)の発展により、慣性センサ(ジャイロセンサ, 加速度センサ)は、小型化, 低価格化が進んでおり, スポーツ工学, 医療工学分野等において慣性センサを用いた運動計測法が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾. 身体運動計測においては, 主に映像情報を用いた DLT 法⁽³⁾が用いられているが, システムが高コストであり, 計測範囲の制限があることから, 低コストであり, 簡易かつ計測範囲に制限されない計測が可能である慣性センサを用いた方法が期待されている.

しかし, 慣性センサから得られる計測情報は, 角速度・加速度であるため, 運動解析において重要な運動情報である, 姿勢情報を直接推定することができない. 慣性センサからの計測情報を用いて姿勢情報を計算するためには, ジャイロセンサから得られる角速度からの変換・積分を行う必要がある. しかし, ジャイロセンサの出力には, ドリフトによる誤差が含まれているため, 積分演算を行うとその誤差が蓄積する. そこで, ドリフトによる誤差を補正する方法として, 加速度センサから得られる重力加速度と, 地磁気センサから得られる磁場を用いることによって誤差を補正するセンサ・フュージョンが提案されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾. これらの方法は, ジャイロセンサのドリフト誤差を補正した姿勢情報を推定することができるが, 加速度センサの出力に含まれる動的加速度(並進加速度, 遠心・接線加速度)を白色雑音として補正しているため, 動的加速度の大きな運動ではドリフトの補正ができず, 精度が低下する. 動的加速度による影響を低減する方法⁽⁸⁾, 遠心・接線加速度の影響に対応した方法⁽⁹⁾が提案されているが, 並進加速度が大きくなる運動においては十分な精度を得ることは難しい. さらに, これらの方法は, 方位角成分の誤差を補正するために, 地磁気センサから得られる磁場を用いており, 磁場発生源や金属等による磁場外乱の影響を受ける環境下においては, 誤差が発生する. そこで, 動的加速度や磁場外乱による影響を受けず, ジャイロセンサのドリフト誤差を 3 次元で補正する方法の構築, 適用が必要である.

本研究では, 相対座標系の運動情報に着目し, 加速度センサのみの情報を用いてジャイロセンサのドリフト誤差を 3 次元的に補正した姿勢情報を推定する方法を提案し, その有効性について検討を行う. 本方法は, 並進加速度による影響を考慮しており, 地磁気センサを使用しないことから磁場外乱による影響もないため, 動的加速度や磁場外乱の発生する環境下における身体運動計測への応用が期待できる.

2.2 姿勢推定法

2.2.1 計測システム

本研究で用いる計測システムを図 2.1 に示す。本計測システムには、3 軸ジャイロセンサ (Invensense, ITG-3200, 測定範囲: $\pm 2000[\text{deg}/\text{sec}]$), 3 軸加速度センサ (Analog Devices, ADXL345, 測定範囲: $\pm 16[\text{G}]$), 3 軸地磁気センサ (愛知製鋼, AMI304, 測定範囲: $\pm 6[\text{gauss}]$) が搭載されており、3 軸の角速度、加速度、磁場を計測可能である。各センサからの情報を取得し、PC へ送信するために、PIC マイコン (Microchip, PIC16F88) を使用している。本計測システムの大きさは $68 \times 18 \times 7\text{mm}$ 、重さ 38g である。

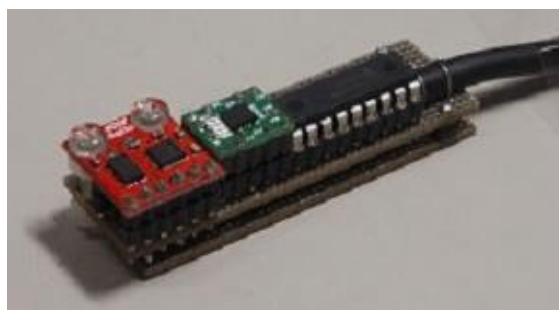


Fig.2.1 Measurement system

2.2.2 初期姿勢推定

計測開始時に静止していれば、加速度センサは重力加速度のみを出力する。重力加速度のみでは、地磁気センサから得られる方位角成分が得られないため、絶対座標系の 3 次元初期姿勢情報を得ることはできない。そこで、相対座標系の 3 次元姿勢情報を重力加速度から算出する。3 次元姿勢情報と重力加速度の関係は非線形となるため、拡張カルマンフィルタ⁽¹⁰⁾を用いて推定する。

相対座標系における 3 次元姿勢情報をロール・ピッチ・ヨー角で表現すると、リンク $i+1$ からリンク i への回転行列 ${}^iR_{i+1}$ は式(2.1)より得られ、それぞれのリンクにおける重力加速度 ${}^i g$, ${}^{i+1} g$ と回転行列の関係は式(2.2)より得られる。

$$\begin{aligned}
 {}^iR_{i+1} &= R({}^i\psi_{i+1}) \cdot R({}^i\theta_{i+1}) \cdot R({}^i\phi_{i+1}) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos^i\psi_{i+1} & -\sin^i\psi_{i+1} & 0 \\ \sin^i\psi_{i+1} & \cos^i\psi_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos^i\theta_{i+1} & 0 & \sin^i\theta_{i+1} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin^i\theta_{i+1} & 0 & \cos^i\theta_{i+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^i\phi_{i+1} & -\sin^i\phi_{i+1} \\ 0 & \sin^i\phi_{i+1} & \cos^i\phi_{i+1} \end{bmatrix} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

$${}^i g = {}^i R_{i+1} {}^{i+1} g \quad (2.2)$$

$${}^i g = \begin{bmatrix} {}^i g_x \\ {}^i g_y \\ {}^i g_z \end{bmatrix}, \quad {}^{i+1} g = \begin{bmatrix} {}^{i+1} g_x \\ {}^{i+1} g_y \\ {}^{i+1} g_z \end{bmatrix}$$

ここで、 ${}^i \varphi_{i+1}$, ${}^i \theta_{i+1}$, ${}^i \psi_{i+1}$ は相対座標系におけるロール角, ピッチ角, ヨー角である.

上式を用いて, 非線形状態方程式, 非線形観測方程式を構築し, 拡張カルマンフィルタ⁽¹⁰⁾を適用することで, 初期姿勢を推定する. 非線形状態方程式, 非線形観測方程式をそれぞれ式(2.3), (2.4)に示す.

$$x_{t+1} = F(x_t) + w_t \quad (2.3)$$

$$x_t = \begin{bmatrix} {}^i \varphi_{i+1} \\ {}^i \theta_{i+1} \\ {}^i \psi_{i+1} \end{bmatrix}, \quad F(x_t) = \begin{bmatrix} {}^i \varphi_{i+1} \\ {}^i \theta_{i+1} \\ {}^i \psi_{i+1} \end{bmatrix}$$

$$y_t = H(x_t) + v_t \quad (2.4)$$

$$y_t = \begin{bmatrix} {}^i g \\ {}^{i+1} g \end{bmatrix}, \quad H(x_t) = \begin{bmatrix} {}^i R_{i+1} & {}^{i+1} g \\ {}^i R_{i+1}^T & {}^i g \end{bmatrix}$$

ここで, w_t , v_t は白色雑音である.

拡張カルマンフィルタを適用するために, 式(2.5), 式(2.6)に示す $F(x_t)$ と $H(x_t)$ の偏微分 $f(x_t)$ と $h(x_t)$ をそれぞれ計算し, 式(2.7)~式(2.11)に示す拡張カルマンフィルタアルゴリズムを推定値が収束するまで繰り返し計算することにより, 初期姿勢を推定する.

$$f(x_t) = \frac{\partial F(x_t)}{\partial x_t} \quad (2.5)$$

$$h(x_t) = \frac{\partial H(x_t)}{\partial x_t} \quad (2.6)$$

$$\bar{x}_t = K(x_t) \quad (2.7)$$

$$\bar{P}_t = F_t P_{t-1} F_t^T + W_t \quad (2.8)$$

$$= K_t^T (P_{t-1} h_t h_t^T + V_t)^{-1} \quad (2.9)$$

$$\bar{x}_t = P_t (-I - K_t h_t) P_{t-1}^{-1} \quad (2.10)$$

$$\bar{x}_t = K_t (y_t - H_t \bar{x}_t) \quad (2.11)$$

ここで、 W, V はプロセスノイズ、観測ノイズの共分散行列であり、それぞれジャイロセンサノイズ、加速度センサノイズを考慮し、 $W = \text{diag}\{0.01^2, 0.01^2, 0.01^2\}$ 、 $V = \text{diag}\{0.01^2, 0.01^2, 0.01^2, 0.01^2, 0.01^2, 0.01^2\}$ とした。

2.2.3 運動中の姿勢推定

運動中の3次元姿勢情報を推定するためのセンサ・フュージョンを、図2.2に示す2リンクモデルにおける角速度、加速度の関係を用いて構成する。

関節 $i+1$ と各リンクに取り付けられた加速度センサの出力との関係⁽¹⁾は式(2.12)、(2.13)で得られる。関節から加速度センサまでの距離がほぼ一定の場合、式(2.14)の関係と、ジャイロセンサの角速度、微分して得られる角加速度より、式(2.12)、(2.13)の第2項である遠心加速度成分、第3項である接線加速度成分を計算可能である。関節 $i+1$ を原点とした加速度センサの遠心加速度成分と接線加速度成分の和を ${}^i A_{ct}$ 、 ${}^{i+1} A_{ct}$ とすると、各加速度センサ出力の関係は、式(2.15)より表すことができる。

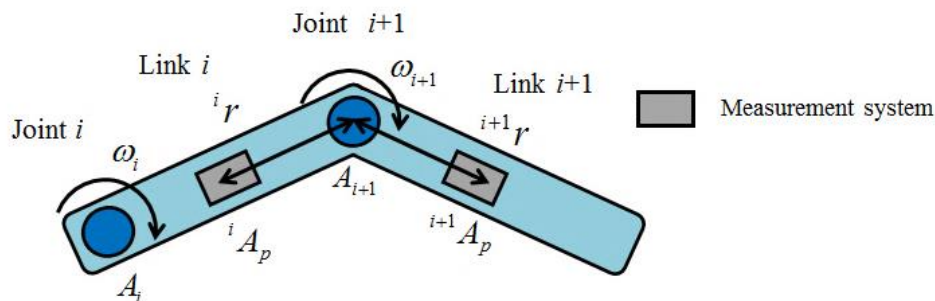


Fig.2.2 Two link model for sensor fusion

$${}^i A_p = {}^i A_{i+1} - {}^i \omega \times {}^i \omega \times {}^i r - {}^i \dot{\omega} \times {}^i r + {}^i g \quad (2.12)$$

$${}^i A_p = \begin{bmatrix} {}^i a_x \\ {}^i a_y \\ {}^i a_z \end{bmatrix}, {}^i \omega = \begin{bmatrix} {}^i \omega_x \\ {}^i \omega_y \\ {}^i \omega_z \end{bmatrix}, {}^i \dot{\omega} = \begin{bmatrix} {}^i \dot{\omega}_x \\ {}^i \dot{\omega}_y \\ {}^i \dot{\omega}_z \end{bmatrix}, {}^i r = \begin{bmatrix} {}^i r_x \\ {}^i r_y \\ {}^i r_z \end{bmatrix}$$

$${}^{i+1} A_p {}^i A_{i+1} = {}^{i+1} \omega \times {}^{i+1} \omega \times {}^{i+1} r - {}^{i+1} \dot{\omega} \times {}^{i+1} r + {}^{i+1} g \quad (2.13)$$

$${}^{i+1} A_p = \begin{bmatrix} {}^{i+1} a_x \\ {}^{i+1} a_y \\ {}^{i+1} a_z \end{bmatrix}, {}^{i+1} \omega = \begin{bmatrix} {}^{i+1} \omega_x \\ {}^{i+1} \omega_y \\ {}^{i+1} \omega_z \end{bmatrix}, {}^{i+1} \dot{\omega} = \begin{bmatrix} {}^{i+1} \dot{\omega}_x \\ {}^{i+1} \dot{\omega}_y \\ {}^{i+1} \dot{\omega}_z \end{bmatrix}, {}^{i+1} r = \begin{bmatrix} {}^{i+1} r_x \\ {}^{i+1} r_y \\ {}^{i+1} r_z \end{bmatrix}$$

$${}^i A_{i+1} A^i = {}^i g {}^i R_{i+1} \left({}^{i+1} A_{i+1} + {}^{i+1} g \right) \quad (2.14)$$

$${}^i A_p + {}^i A_{ct} = {}^i R_{i+1} \left({}^{i+1} A_p - {}^{i+1} A_{ct} \right) \quad (2.15)$$

ここで、 ω_i , ω_{i+1} はリンク i , $i+1$ の角速度、 ${}^i A_{i+1}$, ${}^{i+1} A_{i+1}$ はリンク i 座標系, リンク $i+1$ 座標系における関節 $i+1$ の加速度である. ${}^i A_p$ はリンク i に取り付けられた加速度センサの出力, ${}^{i+1} A_p$ はリンク $i+1$ に取り付けられた加速度センサの出力である. ${}^i r$ は関節 $i+1$ からリンク i に取り付けられた加速度センサまでの位置ベクトルであり, ${}^{i+1} r$ は関節 $i+1$ からリンク $i+1$ に取り付けられた加速度センサまでの位置ベクトルである. なお, \times は外積であり, $[\omega \times]$ は式(2.16)より表わされる.

$$[\omega \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ -\omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

運動中の姿勢情報を推定するための非線形状態方程式は, 角速度から関節角速度 $q = [q_x \ q_y \ q_z]^T$ への変換式⁽¹¹⁾ (式(2.17)), 関節角速度からロール・ピッチ・ヨー角の微分値への変換式⁽⁶⁾ (式(2.18)) を用いて構成し, 非線形観測方程式は, 式(2.15)を用いて構成する. 構築した非線形状態方程式, 観測方程式を式(2.19), (2.20)に示す.

$$(2.17)$$

$$q = {}^{i+1}\omega - {}^iR_{i+1}^T {}^i\omega$$

$$\begin{bmatrix} {}^i\dot{\psi}_{i+1} \\ {}^i\dot{\theta}_{i+1} \\ {}^i\dot{\phi}_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin^i\phi_{i+1} \sec^i\theta_{i+1} & \cos^i\phi_{i+1} \sec^i\theta_{i+1} \\ 0 & \cos^i\phi_{i+1} & -\sin^i\phi_{i+1} \\ 1 & \sin^i\phi_{i+1} \tan^i\theta_{i+1} & \cos^i\phi_{i+1} \tan^i\theta_{i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$x_{t+1} = F(x_t) + w_t \quad (2.19)$$

$$x_t = \begin{bmatrix} {}^i\phi_{i+1} \\ {}^i\theta_{i+1} \\ {}^i\psi_{i+1} \end{bmatrix}$$

$$F(x_t) = \begin{bmatrix} q_x \cdot Ts + \sin^i\phi_{i+1} \tan^i\theta_{i+1} q_y \cdot Ts + \cos^i\phi_{i+1} \tan^i\theta_{i+1} q_z \cdot Ts \\ \cos^i\phi_{i+1} q_y \cdot Ts - \sin^i\phi_{i+1} q_z \cdot Ts \\ \sin^i\phi_{i+1} \sec^i\theta_{i+1} q_y \cdot Ts + \cos^i\phi_{i+1} \sec^i\theta_{i+1} q_z \cdot Ts \end{bmatrix}$$

$$y_t = H(x_t) + v_t \quad (2.20)$$

$$y_t = \begin{bmatrix} {}^iA_p + {}^iA_{ct} \\ {}^{i+1}A_p - {}^{i+1}A_{ct} \end{bmatrix}, H(x_t) = \begin{bmatrix} {}^iR_{i+1} \left({}^{i+1}A_p - {}^{i+1}A_{ct} \right) \\ {}^iR_{i+1}^T \left({}^iA_p + {}^iA_{ct} \right) \end{bmatrix}$$

ここで、Ts はサンプリング周期である。

構築した非線形状態方程式、非線形観測方程式に拡張カルマンフィルタを適用し、ロール・ピッチ・ヨー角を推定する。しかし、本研究で構築した非線形観測方程式のシステム行列 $H(x_t)$ には、加速度センサの出力が含まれていることから、非線形性が強く、偏微分を用いて部分的に線形化をしている拡張カルマンフィルタでは、補正が不十分となる可能性がある。そこで、非線形性の強いシステムに対応するために、アンセンテッドカルマンフィルタアルゴリズム⁽¹⁰⁾の構築、適用を行う。アンセンテッドカルマンフィルタは、アンセンテッド変換を使用することにより、非線形状態方程式、非線形観測方程式をテーラー展開の2次の項まで近似可能な非線形カルマンフィルタであり、非線形性の強い状態方程式、観測方程式においては、拡張カルマンフィルタよりも高精度な推定結果が期待できる。

アンセンテッドカルマンフィルタを適用するためのシグマポイントは式(2.21)～(2.23)より計算する。

$$x_0 = \bar{x} \quad (2.21)$$

$$x_i = \bar{x} + \left(\sqrt{(n+\lambda)P_x} \right)_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.22)$$

$$x_i = \bar{x} - \left(\sqrt{(n+\lambda)P_x} \right)_{i-n} \quad i = n+1, n+2, \dots, n \quad (2.23)$$

ここで、 \bar{x} は状態量の平均値、 λ はシグマポイントを設定するためのスケーリングパラメータであり、 P_x は誤差共分散行列 P_t の下三角行列である。本研究では、 $\lambda=10$ とし、 P_x は P_t からコレスキー法を用いて算出した。なお、推定する状態量（姿勢情報）の初期値は、第 2.2.2 節にて推定した初期値を用いて式(2.24)で表し、誤差共分散行列の初期値は式(2.25)、(2.26)より得られる。

$$x_{t_0} = \begin{bmatrix} {}^i\varphi_{i+1} & {}^i\theta_{i+1} & {}^i\psi_{i+1} \end{bmatrix}^T \quad (2.24)$$

$$\hat{x}_{t_0} = E[x_{t_0} x_{t_0}^T] \quad (2.25)$$

$$P_{t_0} = E\left\{ \left(x_{t_0} - \hat{x}_{t_0} \right) \left(x_{t_0} - \hat{x}_{t_0} \right)^T \right\} \quad (2.26)$$

なお、運動中の姿勢情報を計測するための拡張カルマンフィルタ、アンセンテッドカルマンフィルタアルゴリズムにおけるプロセスノイズ、観測ノイズの共分散行列 W_t, V_t は式(2.15)、(2.16)およびセンサノイズより構成され、式(2.27)、(2.28)を用いる。なお、 w, v はセンサノイズの重みを表し、 $w = [0.001 \ 0.001 \ 0.001]^T$ 、 $v = [0.001 \ 0.001 \ 0.001]^T$ とした。

$$W_t = \text{diag} \left\{ \sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2 \right\} \quad (2.27)$$

$$\sigma_1 = \left| \sigma_a \right| + \left| \sin^i \varphi_{i+1} \tan^i \theta_{i+1} \sigma_b \right| + \left| \cos^i \varphi_{i+1} \tan^i \theta_{i+1} \sigma_c \right|$$

$$\sigma_2 = \left| \cos^i \varphi_{i+1} \sigma_b \right| + \left| \sin^i \varphi_{i+1} \sigma_c \right|$$

$$\sigma_3 = \left| \sin^i \varphi_{i+1} \sec^i \theta_{i+1} \sigma_b \right| + \left| \cos^i \varphi_{i+1} \sec^i \theta_{i+1} \sigma_c \right|$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_a \\ \sigma_b \\ \sigma_c \end{bmatrix} = \mathfrak{w} \left| {}^i \bar{\mathbf{R}}_{i+1} \mathfrak{w} \right|$$

$$V_{(t)} = \text{diag} \{ \nu_1^2, \nu_2^2, \nu_3^2, \nu_4^2, \nu_5^2, \nu_6^2 \} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix} = \left| {}^i \mathbf{R}_{i+1} \nu \right| + \nu, \quad \begin{bmatrix} \nu_4 \\ \nu_5 \\ \nu_6 \end{bmatrix} = \left| {}^i \mathbf{R}_{i+1}^T \nu \right| + \nu$$

ここで、 $|\cdot|$ は \cdot の絶対値を表す。

以上より、拡張カルマンフィルタ、アンセンテッドカルマンフィルタを用いて、相対座標系のロール・ピッチ・ヨー角を推定する。本研究にて構築した、センサ・フュージョンのブロック線図を図 2.3 に示す。

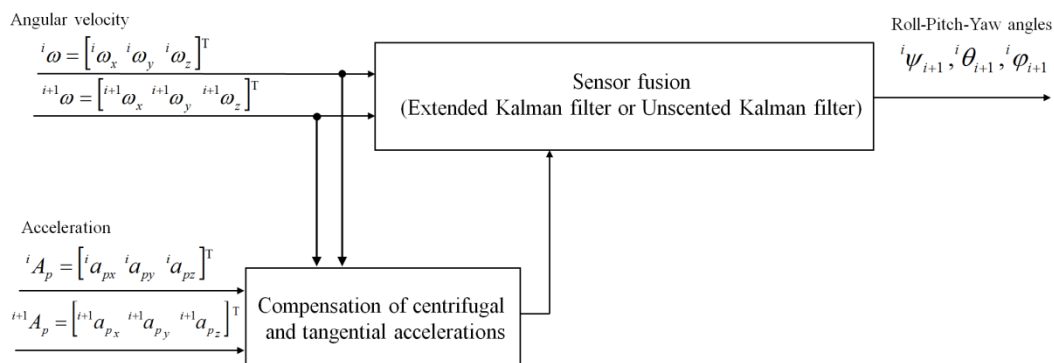


Fig. 2.3 Block diagram for the estimation of 3D posture

2.3 計測実験

2.3.1 実験装置

本研究で提案した方法の精度を示すために、ロータリーエンコーダを搭載し、肩関節をモデルとした実験装置から得られる角度と本方法を用いて推定した姿勢情報との比較を行った。実験装置と計測システムの取り付け位置を図 2.4 に示す。本装置は、各軸周りに 3 個のエンコーダ (Microtech Inc, MEH-60-360) を搭載しており、3 自由度の関節角度計測が可能である。エンコーダはパルスカウンタ (Interface, LPC-631204) を用いて PC と接続しており、計測システムと同期してデータを取得することができる。実験装置に計測システムを取り付け、計測開始後約 5 秒間静止した後に、手動でロール・ピッチ・ヨー角のすべてが変化するように回転させ、計測システムとエンコーダからの情報を計測した。実験は、磁場外乱が発生する屋内環境 (鉄筋コンクリート造の建物内) にて、並進加速度が発生していない状態と、並進加速度が発生している状態にて行った。並進加速度は、実験装置を台車に乗せ、手動で台車を往復運動することにより発生させた。計測システムのサンプリング周波数は 100Hz であり、計測時間は 30 秒である。

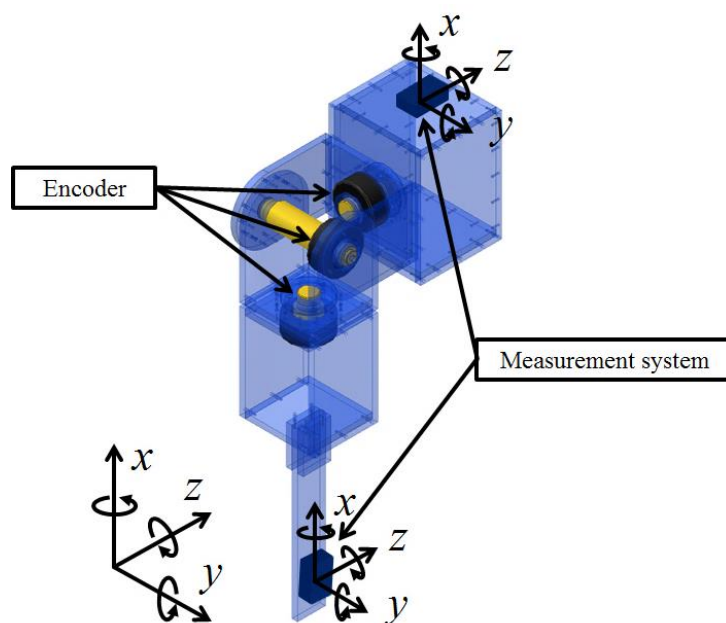


Fig.2.4 Experimental setup and setting position of measurement systems

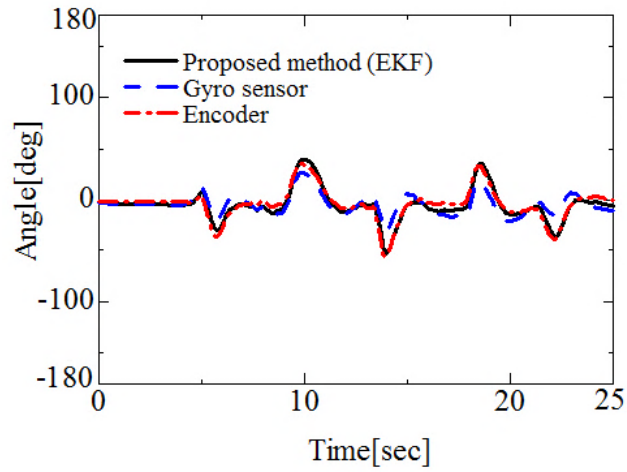
2.3.2 実験結果（並進加速度なし）

計測実験から得られた計測情報に拡張カルマンフィルタ(EKF), アンセンテッドカルマンフィルタ(UKF)を用いたセンサ・フュージョンを適用し, 推定した結果(ロール・ピッチ・ヨー角)と, ジャイロセンサの出力に式(2.17), (2.18)を用いて算出した結果, ロータリーエンコーダから得られた結果をそれぞれ図 2.5, 図 2.6 に示す. ロータリーエンコーダの結果を真値とし, センサ・フュージョンを用いて推定した結果, ジャイロセンサから算出した結果との二乗平均誤差を表 2.1 に示す.

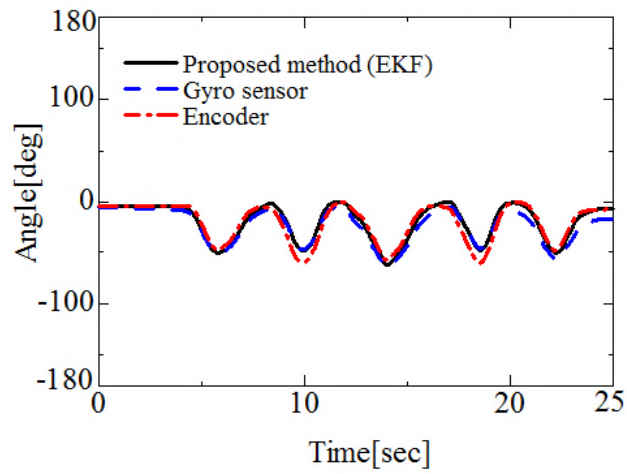
ジャイロセンサから算出したロール・ピッチ・ヨー角は, ドリフトによる誤差が積分演算によって蓄積しているため, 誤差が時間経過と共に大きくなっているが, 拡張カルマンフィルタ, アンセンテッドカルマンフィルタを用いた両結果において, ドリフトによる誤差を補正した結果が得られた. しかし, 拡張カルマンフィルタを用いて推定したロール角, ピッチ角の結果(図 2.5(a), (b))の一部において, エンコーダの結果との誤差が大きくなっている. 一方, アンセンテッドカルマンフィルタを用いた結果(図 2.6(a), (b))は, 観測方程式の非線形性に対応していることから, 拡張カルマンフィルタを用いた結果よりもエンコーダの結果と一致した結果が得られた. 二乗平均誤差の結果(表 2.1)に着目すると, ロール・ピッチ・ヨー角すべての結果において, アンセンテッドカルマンフィルタを用いた結果は, 拡張カルマンフィルタを用いた結果よりも高精度な結果を示した.

Table 2.1 Root mean square error [deg]

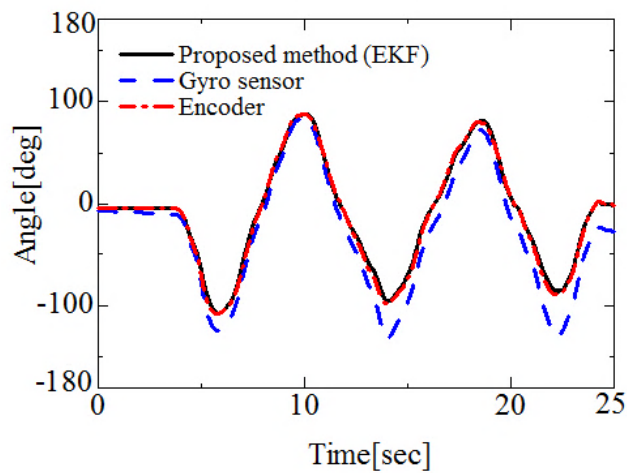
	Roll angle	Pitch angle	Yaw angle
Gyro sensor	7.82	7.29	13.79
Proposed method (EKF)	3.22	4.18	1.81
Proposed method (UKF)	2.55	1.68	1.45



(a) Roll angle

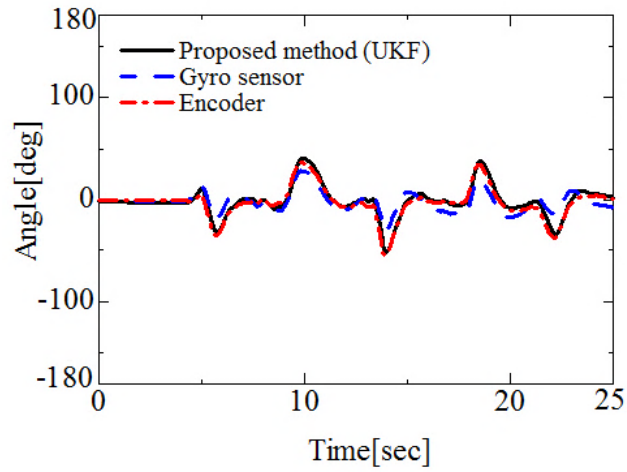


(b) Pitch angle

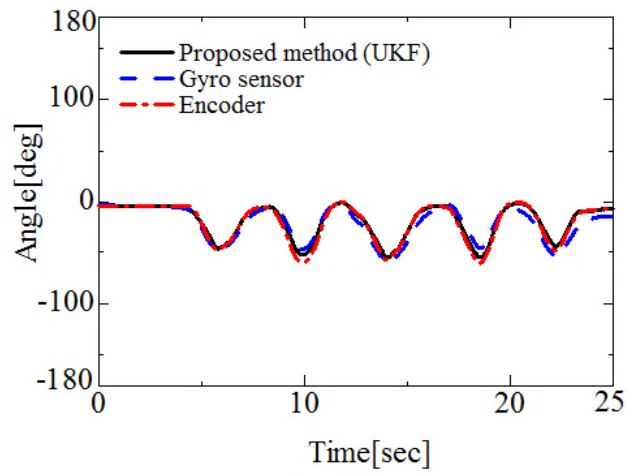


(c) Yaw angle

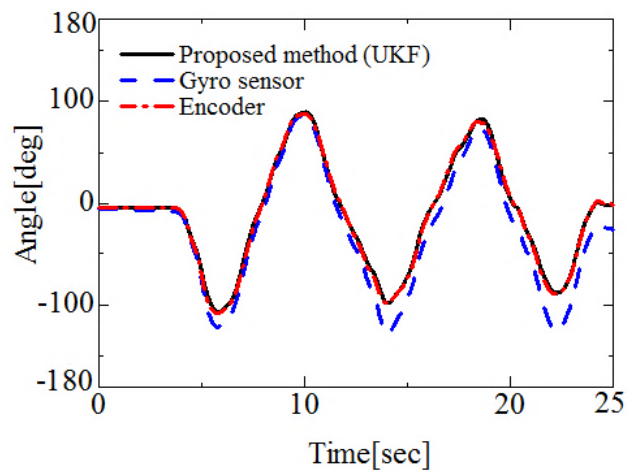
Fig. 2.5 3D posture (No translational acceleration)
(Proposed method (EKF), Gyro sensor and Encoder)



(a) Roll angle



(b) Pitch angle



(c) Yaw angle

Fig. 2.6 3D posture (No translational acceleration)
(Proposed method (UKF), Gyro sensor and Encoder)

2.3.3 実験結果（並進加速度あり）及び実験結果

本方法が並進加速度による影響と磁場外乱による影響に対応していることを示すため、並進加速度発生下における計測実験を磁場外乱の発生する屋内環境にて行った。並進加速度（重力加速度を除去した基準リンクにおける加速度センサ出力）を図 2.7 に示す。得られた計測情報に本方法（アンセンテッドカルマンフィルタを使用）と先行研究による方法⁽⁹⁾を適用し、得られた姿勢情報の結果を図 2.8 に示す。

先行研究による方法は、遠心・接線加速度成分の影響に対応しているが、並進加速度成分には対応していない。そのため、重力加速度を用いてドリフトによる誤差を補正しているピッチ角とヨー角には大きな誤差が発生しており、磁場を用いてドリフトによる誤差を補正しているロール角においては、屋内環境において発生する磁場外乱の影響によって誤差が発生している。

本方法は、並進加速度による影響を受けず、地磁気センサを用いていないことから、磁場外乱による影響も受けないため、ロール・ピッチ・ヨー角すべてにおいてドリフトによる誤差を補正し、エンコーダからの角度とほぼ一致した結果が得られた。本方法による結果とエンコーダの結果との二乗平均誤差は、ロール角：2.14[deg]、ピッチ角：2.19[deg]、ヨー角：2.24[deg]であり、並進加速度無しの場合とほぼ同程度の精度を得ている。以上より、本方法は並進加速度が発生している場合においてもドリフトによる誤差を補正した 3 次元姿勢推定が可能である。

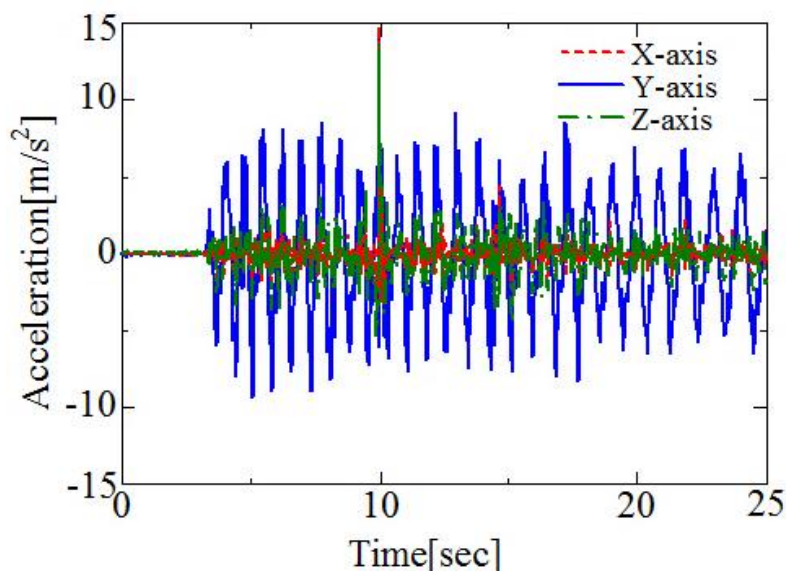
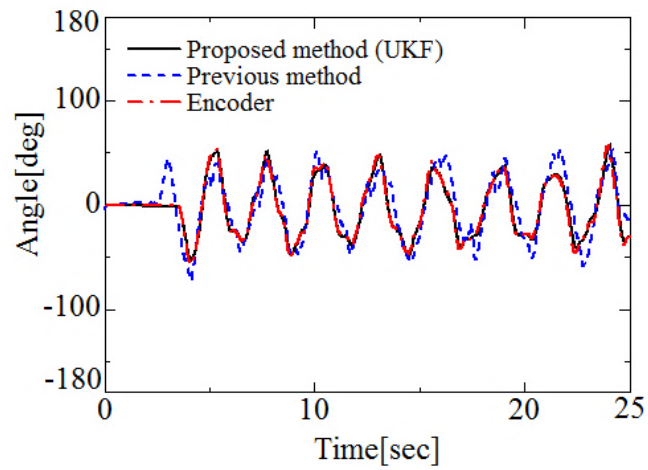
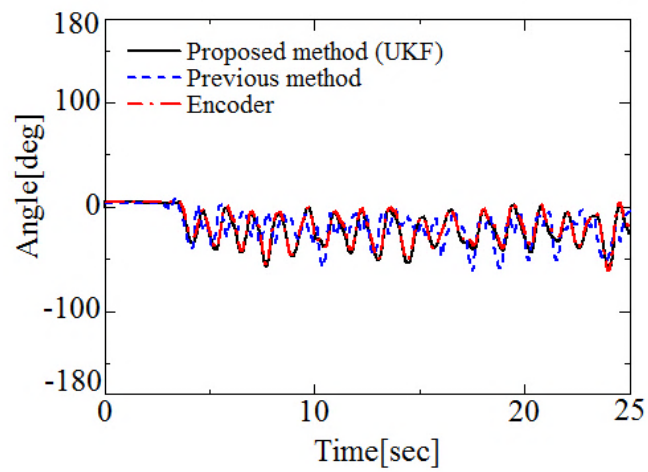


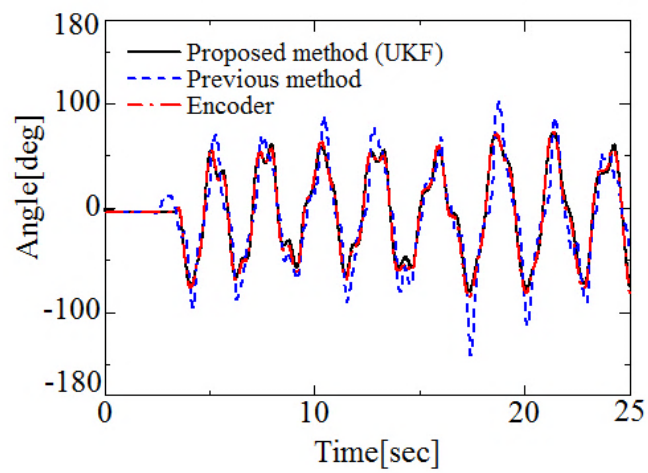
Fig.2.7 Translational accelerations generated during the experiment



(a) Roll angle



(b) Pitch angle



(c) Yaw angle

Fig.2.8 3D posture (With translational acceleration)
(Proposed method(UKF), Previous method and Encoder)

2.4 結言

本研究では、慣性センサを用いて相対座標系における 3 次元姿勢情報を推定するための新しい方法を構築した。本方法の精度を検証するために、ロータリーエンコーダを各軸に搭載し、3次元姿勢計測を可能とする実験装置を用いた検証実験を行い、ジャイロセンサのドリフトによる誤差を補正した結果を得た。アンセンテッドカルマンフィルタを用いた方法は、拡張カルマンフィルタを用いた方法よりも高精度な結果を推定した。また、並進加速度、磁場外乱の発生する環境における計測実験を行い、本方法による結果は、並進加速度、磁場外乱による影響を受けず、ドリフトによる誤差を補正した結果を推定することができた。以上より、本研究において提案した方法の有効性を示した。

本方法は、地磁気センサを用いていないため、地磁気センサの精度が低下する屋内等の環境下や並進加速度が発生する実験環境下においても使用できる。従って、環境に左右されない身体運動計測が可能であり、スポーツ分野や医療分野等への応用が期待できる。

2.5 参考文献

- (1) 穂苅真樹, 渡辺, 嘉二郎, 栗原陽介, 瀬川友輔, 鳴尾丈司, スポーツフォームの運動解析と計測 : ゴルフドライバースイングフォームの計測, 計測自動制御学会論文集, 第 38 巻第 11 号, 922 頁~930 頁 (2002).
- (2) 古瀬則夫, 渡邊高志, 星宮望, 圧電式ジャイロ스코ープを用いた下肢関節角度の簡易計測法, 生体医工学 : 日本エム・イー学会誌, 第 43 巻第 4 号, 538 頁~543 頁 (2005).
- (3) 池上康男, 桜井信二, 矢部京之助, DLT 法, Japan Journal of Sport Science, 第 10 巻第 3 号, 191 頁~195 頁 (1991).
- (4) Foxlin, E., Inertial Head-Tracker Sensor Fusion by a Complementary Separate-Bias Kalman Filter”, IEEE Proceedings of VRAIS’96, pp.185-194 (1996).
- (5) Vahanay, J., and Aldon, J.M., A. Fournier Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data, Proceedings of the IEEE international conference on Robotics and Automation 1993, pp.277-282 (1993).
- (6) Jurman, D., Jankovec, M., Kamnik, R., and Topic, M., Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system, Sensors and Actuators A, Vol. 138, pp.411-420 (2007).
- (7) Sabatini, M.A., Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 53, No. 7, pp.1346-1356 (2006).
- (8) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 永作清, 拡張カルマンフィルタを用いたスキー・ターンの運動計測と力学解析に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 第 77 巻第 774 号, 470 頁~480 頁 (2011).
- (9) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, 慣性センサ・地磁気センサを用いたスポーツにおける姿勢計測に関する研究, スポーツ産業学研究, 第 22 巻第 2 号, 255 頁~262 頁 (2012).
- (10) 谷萩隆嗣, カルマンフィルタと適応信号処理, コロナ社, 47 頁~59 頁 (2005).

- (11) 吉川恒夫, ロボット制御基礎論, コロナ社, 86 頁～94 頁 (1998).

第 3 章

慣性センサを用いた実滑走スキーヤーの 3 次元 姿勢計測

The purpose of this study is to propose the motion measurement method of skiing turn using inertial sensor. This method calculates the joint angle of the skier gliding on the actual snow field using the information from the inertial sensor units. The sensor fusion estimates the 3D posture (Roll-Pitch-Yaw angles) of local coordinate system compensated drift error of gyro sensor output using acceleration sensor output. The unscented Kalman filter is used to apply the sensor fusion. The joint angle is calculated by applying inverse kinematics to the 3D posture.

In this study, the measurement experiment was conducted by the skier gliding on the actual snow field. The inertial sensor units were attached to body segments of skier. We obtained the joint angle of skier (Lumber, hip, knee and ankle). The results of motion analysis represented the major features of skiing turn, and the effectiveness of our proposed method was indicated.

3.1 諸言

スキーは、冬季を代表するスポーツであり、産業規模も大きいことから、様々な分野における研究⁽¹⁾⁽²⁾が行われている。スキー・ターンのメカニズムを解明するための研究として、スキーロボット、ターンモデルの開発⁽³⁾⁽⁴⁾等の研究が行われているが、屋内の限定された環境における研究であるため、実際の雪面を滑走するスキーヤーによるターンの運動計測、解析を行う必要がある。しかし、雪面を高速で滑走するスキーヤーの運動を捉えるには、広い計測範囲を確保する必要があるため、主にスポーツの運動計測に用いられている、高速度カメラを用いた DLT 法⁽⁵⁾の適用は難しい。実滑走におけるスキー・ターンの運動計測に関する研究としては、スキーヤー用筋電計測装置の開発⁽⁶⁾⁽⁷⁾やエッジング量、方位の計測⁽⁸⁾等、が行われているが、スキー・ターンのメカニズムを解明するためには、スキーヤーの身体運動計測、解析が必要不可欠である。

実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動計測に関する研究として、3次元磁気式位置センサを用いた運動計測法⁽⁹⁾が提案されているが、3次元磁気式位置センサを用いた方法は、各身体部位の相対位置を計測することができるが、高重量であり、スキーヤーに拘束を強い可能性がある。ジャイロセンサを用いた方法⁽¹⁰⁾は、センサを取り付けた身体部位の角速度を計測することができ、積分演算を行うことでスキーヤーの滑走フォームを解析するために必要な関節角度が得られる。しかし、ジャイロセンサの出力にはドリフトによる誤差が含まれており、積分演算によって誤差が蓄積し、時間の経過に伴い精度が低下する。ドリフトによる誤差を補正するために、慣性センサ・地磁気センサを搭載した計測システムから得られる情報にセンサ・フュージョンを適用し、ドリフトによる誤差を補正した関節角度の推定⁽¹¹⁾⁽¹²⁾が行われている。この方法では、加速度センサの出力を重力加速度として用いることにより、ドリフトによる誤差を補正しているが、加速度センサが検出する動的加速度が誤差となる。廣瀬らは、2つの計測システムの情報を用いて動的加速度の影響を低減させる方法⁽¹³⁾を提案しているが、高速なスキー滑走においては十分な補正ができず、精度が低下する可能性がある。

以上より、第2章で構築した方法をスキー・ターンの運動解析へ展開し、スキーヤーの3次元姿勢情報を計測する。本方法は、並進加速度が大きい場合にも3次元姿勢情報を推定可能であることから、これまでは計測できなかった高速なターンの運動計測へ適用し、解析法の有効性を示す。

3.2. 計測システム

本研究で用いる計測システムを図 3.1 に示す。本計測システムは 1 軸ジャイロセンサ (Analog Devices, ADIS16110), 3 軸加速度センサ (Hitachi metals, H30CD) を搭載している。ジャイロセンサは 3 次元直交配置されており, 本計測システムは 3 軸の角速度, 加速度を計測可能である。計測した情報は, PIC マイクロコントローラ (PIC16F88) により収集し, シリアル通信によって PC へ送られる。計測システムの大きさは $65 \times 45 \times 25 \text{mm}$, 重さは 65g である。また, 本計測システムのサンプリング周波数は 100Hz である。

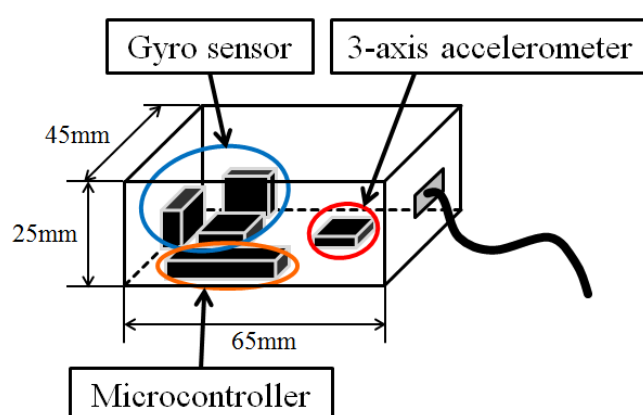


Fig.3.1 Measurement system

3.3 姿勢推定法

本研究では、第2章にて構築した、ジャイロセンサのドリフトによる誤差を加速度センサの並進加速度と重力加速度を用いて3次元的に補正し、相対座標系の姿勢情報（ロール・ピッチ・ヨー角）を推定するセンサ・フュージョンを適用する。ロール・ピッチ・ヨー角は、 z 軸→ y 軸→ x 軸の順に各軸を回転させたものと定義する。センサ・フュージョンには、アンセンテッドカルマンフィルタ⁽¹⁴⁾を用いる。アンセンテッドカルマンフィルタは、非線形カルマンフィルタ（状態方程式、観測方程式が非線形の場合においても適用可能なカルマンフィルタ）の一種であり、アンセンテッド変換を用いて推定値の共分散行列を推定することから、偏微分を用いて非線形状態方程式、非線形観測方程式を部分的に近似する拡張カルマンフィルタよりも高精度な結果を得ることができる⁽¹⁴⁾。本方法は、図3.2に示す2リンクモデルにおける角速度、加速度の関係を用いて構成しており、本方法における非線形状態方程式、非線形観測方程式を式(3.1)、式(3.2)にそれぞれ示す。

$$x_{t+1} = F(x_t) + w_t \quad (3.1)$$

$$y_t = H(x_t) + v_t \quad (3.2)$$

$$x_t = \begin{bmatrix} {}^i\varphi_{i+1} \\ {}^i\theta_{i+1} \\ {}^i\psi_{i+1} \end{bmatrix}, y_t = \begin{bmatrix} {}^iA_p - {}^iA_{ct} \\ {}^{i+1}A_p + {}^{i+1}A_{ct} \end{bmatrix}$$

$$F(x_t) = \begin{bmatrix} {}^i u_x + \sin {}^i\varphi_{i+1} \tan {}^i\theta_{i+1} {}^i u_y + \cos {}^i\varphi_{i+1} \tan {}^i\theta_{i+1} {}^i u_z \\ \cos {}^i\varphi_{i+1} {}^i u_y - \sin {}^i\varphi_{i+1} {}^i u_z \\ \sin {}^i\varphi_{i+1} \sec {}^i\theta_{i+1} {}^i u_y + \cos {}^i\varphi_{i+1} \sec {}^i\theta_{i+1} {}^i u_z \end{bmatrix}$$

$$H(x_t) = \begin{bmatrix} {}^i R_{i+1} \left({}^{i+1}A_p + {}^{i+1}A_{ct} \right) \\ {}^i R_{i+1}^T \left({}^iA_p - {}^iA_{ct} \right) \end{bmatrix}$$

ここで、 w_t , v_t は白色雑音である。推定値 x_t は相対座標系のロール・ピッチ・ヨー角 (${}^i\varphi_{i+1}$, ${}^i\theta_{i+1}$, ${}^i\psi_{i+1}$) であり、リンク i とリンク $i+1$ の間の姿勢情報を示している。また、非線形状態方程式内のシステム行列 $F(x_t)$ は、関節角速度 ${}^i u$ とロール・ピッチ・ヨー角との関係式（式(3.3)）によって構成され、関節角速度は、リンク i の角速度 ${}^i\omega$ とリンク $i+1$ の角速度 ${}^{i+1}\omega$ を用いて式(3.4)より算出する。

$$\begin{bmatrix} {}^i\dot{\psi}_{i+1} \\ {}^i\dot{\theta}_{i+1} \\ {}^i\dot{\phi}_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin^i\varphi_{i+1} \sec^i\theta_{i+1} & \cos^i\varphi_{i+1} \sec^i\theta_{i+1} \\ 0 & \cos^i\varphi_{i+1} & -\sin^i\varphi_{i+1} \\ 1 & \sin^i\varphi_{i+1} \tan^i\theta_{i+1} & \cos^i\varphi_{i+1} \tan^i\theta_{i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^i u_x \\ {}^i u_y \\ {}^i u_z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^i u = {}^i \omega - {}^{i-1}R_i^T {}^{i-1} \omega \quad (3.4)$$

ここで、 ${}^iR_{i+1}$ はリンク $i+1$ 座標系からリンク i 座標系へ変換する回転行列であり、式(3.5)より表される。

$$\begin{aligned} {}^iR_{i+1} &= R({}^i\psi_{i+1}) \cdot R({}^i\theta_{i+1}) \cdot R({}^i\varphi_{i+1}) \\ &= \begin{bmatrix} \cos^i\psi_{i+1} & -\sin^i\psi_{i+1} & 0 \\ \sin^i\psi_{i+1} & \cos^i\psi_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos^i\theta_{i+1} & 0 & \sin^i\theta_{i+1} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin^i\theta_{i+1} & 0 & \cos^i\theta_{i+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^i\varphi_{i+1} & -\sin^i\varphi_{i+1} \\ 0 & \sin^i\varphi_{i+1} & \cos^i\varphi_{i+1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.5)$$

観測値 y_i は、関節における並進加速度と重力加速度との和であり、非線形観測方程式のシステム行列 $H(x_i)$ は、関節 $i+1$ における加速度の関係によって構成される。 ${}^iA_p, {}^{i+1}A_p$ はリンク i 、リンク $i+1$ に取り付けられた加速度センサの出力、 ${}^iA_{ct}, {}^{i+1}A_{ct}$ はリンク i 、リンク $i+1$ における遠心加速度と接線加速度の和であり、 ${}^iA_{ct}, {}^{i+1}A_{ct}$ は角速度 ${}^i\omega$ 、角加速度 ${}^i\dot{\omega}$ 、加速度センサから関節 i までの位置ベクトル ${}^i r$ を用いて式(3.6)より表される。

$${}^iA_{ct} = {}^i\omega \times {}^i\omega \times {}^i r + {}^i\dot{\omega} \times {}^i r \quad (3.6)$$

以上より得られた非線形状態方程式、非線形観測方程式をアンセンテッドカルマンフィルタに適用し、姿勢情報を推定する。センサ・フュージョンのブロック線図を図 3.3 に示す。

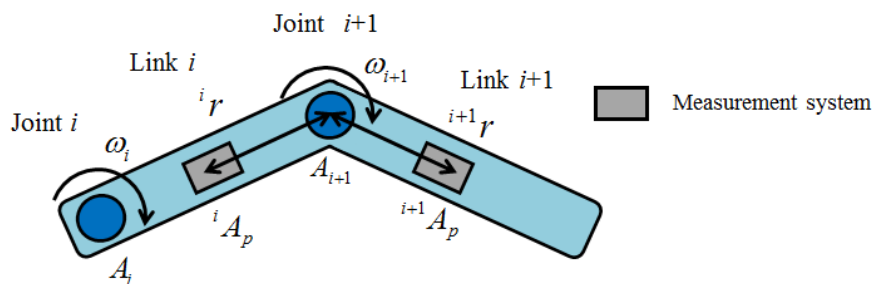


図 3.2 2 link model

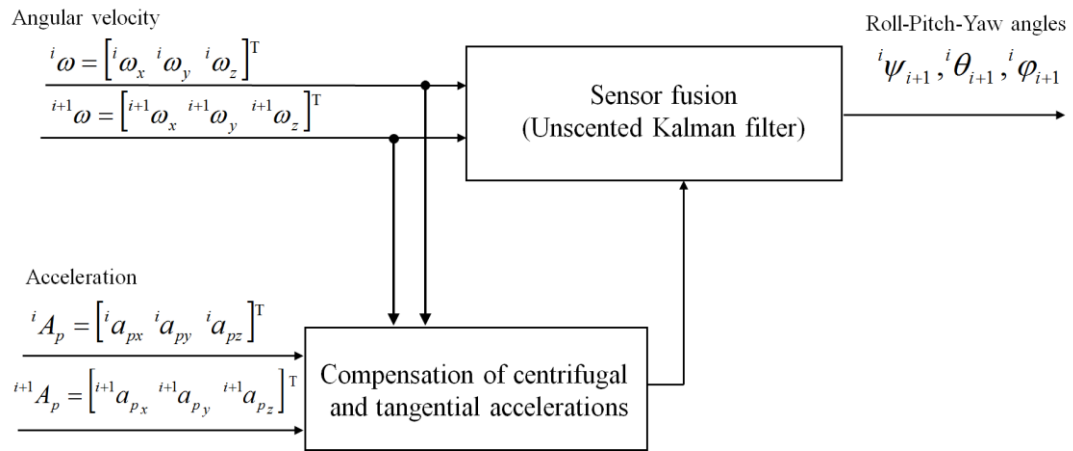


Fig.3.3 Block diagram for estimation of 3D posture

3.4 運動解析法

本研究では、実際の雪面においてカービングターンを行うスキーヤーの関節角度を用いた運動解析を行う。関節角度は、3次元剛体リンクモデル⁽¹⁵⁾に推定した姿勢情報を適用することにより算出する。本研究で用いる3次元剛体リンクモデルと座標系を図3.4に示す。本モデルは腰椎関節、左右股関節、左右膝関節、左右足関節から成り、スキーヤーの上体部と腰部にとりつけた計測システムが成す角度を腰椎関節としている。座標系は、スキーヤーの進行方向をX軸とした右手座標系とし、各軸周りの回転方向は反時計回りを正方向とした。ここで、腰椎関節を3自由度、股関節を3自由度、膝関節を1自由度、足関節を3自由度と定義している。各関節情報を表3.1に示す。なお、 Ψ は内外旋角度、回旋角度、回内外角度、 θ は屈曲伸展角度、底屈背屈角度、 Φ は側屈角度、内外転角度、内外反角度をそれぞれ示している。

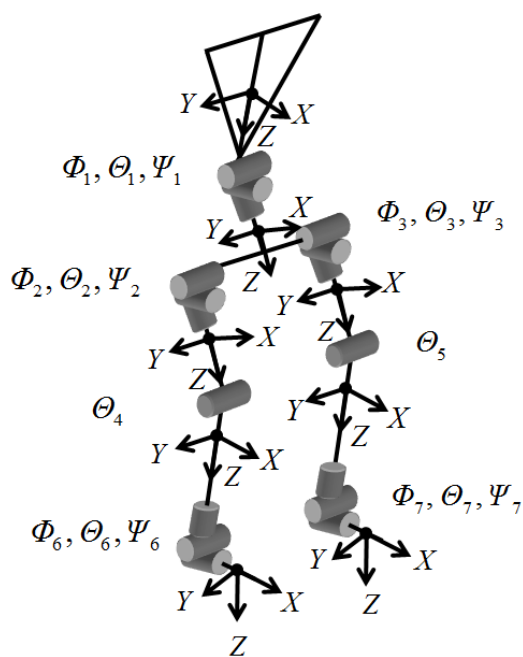


Fig.3.4 3D rigid link model

Table 3.1 Definition of joint for rigid link model

Φ_1	Lumber lateral fold to left (+) to right (-)
Θ_1	Lumber extension (-) flexion (+)
Ψ_1	Lumber left rotation (-) right rotation (+)
Φ_2	Right hip adduction (+) abduction (-)
Θ_2	Right hip extension (-) flexion (+)
Ψ_2	Right hip internal rotation (-) external rotation (+)
Φ_3	Left hip extension (-) flexion (+)
Θ_3	Left hip adduction (-) abduction (+)
Ψ_3	Left hip internal rotation (-) external rotation (+)
Θ_4	Right knee flexion (-) extension (+)
Θ_5	Left knee flexion (-) extension (+)
Φ_6	Right lower thigh pronation (+) supination (-)
Θ_6	Right foot plantar flexion (-) dorsal flexion (+)
Ψ_6	Right foot varus (+) valgus (-)
Φ_7	Left lower thigh pronation (-) supination (+)
Θ_7	Left foot plantar flexion (-) dorsal flexion (+)
Ψ_7	Left foot varus (-) valgus (+)

本研究では、計測システムをスキーヤーの上部部、腰部、左右大腿部、左右下腿部、左右足部の計8カ所に取り付ける。計測システムの取り付け位置を図3.5に示す。

得られた3次元姿勢情報を、式(3.7)より相対座標系の回転行列へ変換し、その後、逆運動学⁽¹⁶⁾を適用することにより各関節角度を算出する。関節角度は、スキーヤーの運動を考慮し、Y軸（屈曲伸展角度、底屈背屈角度）→Z軸（内外旋角度、回旋角度、回内外角度）→X軸（側屈角度、内外転角度、内外反角度）の順で回転させたものとし、 Ψ 、 Θ 、 Φ はそれぞれ式(3.8)～(3.10)を用いて算出する。

$${}^i R_{i+1} = \begin{bmatrix} \cos^i \psi_{i+1} & -\sin^i \psi_{i+1} & 0 \\ \sin^i \psi_{i+1} & \cos^i \psi_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos^i \theta_{i+1} & 0 & \sin^i \theta_{i+1} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin^i \theta_{i+1} & 0 & \cos^i \theta_{i+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^i \varphi_{i+1} & -\sin^i \varphi_{i+1} \\ 0 & \sin^i \varphi_{i+1} & \cos^i \varphi_{i+1} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\Psi = \text{atan} \frac{R_{21}}{R_{22}} \quad (3.8)$$

$$\Theta = \text{atan} \frac{R_{13}}{R_{33}} \quad (3.9)$$

$$\Phi = \text{atan} \frac{-R_{23}}{\sqrt{R_{21} \cdot R_{21} + R_{22} \cdot R_{22}}} \quad (3.10)$$

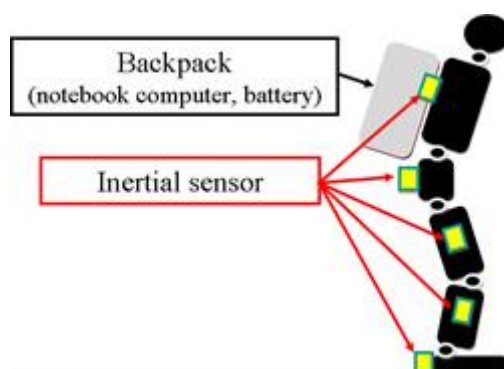


Fig.3.5 Setting positions of measurement systems

3.5 計測実験

3.5.1 実験方法

計測システムを被験者の各身体部位（上部、腰部、左右大腿部、左右下腿部、左右足部）に取り付け、計測実験を行った。被験者は、年齢 23 歳、身長 180cm、体重 70kg、スキー歴 17 年の男性であり、全日本スキー連盟準指導員資格を有している。また、被験者には事前に実験方法や安全性についての十分な説明を行い、実験に参加する同意を得た。スキーヤーは、平均斜度 10 度のコースを、助走を行った後に、カービングターンを繰り返し行いながら滑走した。実験コースの概要を図 3.6 に示す。本実験における計測時間は 30 秒、サンプリング周波数は 100Hz であり、使用したスキー板の長さは 165cm である。

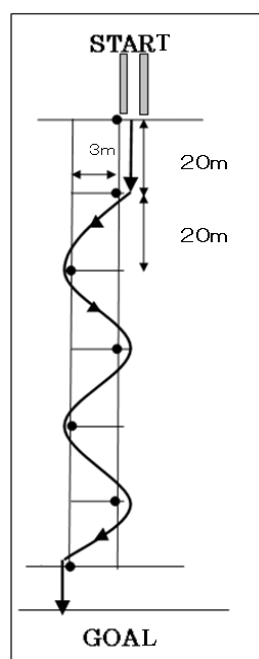


Fig.3.6 Experimental course

3.5.2 実験結果

腰椎関節角度（回旋角度）の結果を図 3.7 に示す。ジャイロセンサ出力より算出した結果は、ドリフトによる誤差を含んでおり、時間の経過に伴い誤差が増大している。一方、センサ・フュージョンを適用した結果においては、ドリフトによる誤差が補正されている。

関節角度推定結果を図 3.8～3.11 に示す。全ての結果において、センサ・フュージョンを適用した結果はドリフトによる誤差が補正されている。腰椎関節（図 3.8）においては、側屈角度のピーク値と回旋角度のピーク値がほぼ一致しており、この結果は、ターンを行うためのひねり動作を捉えていることを示している。股関節（図 3.9）と膝関節（図 3.10）の関係に着目すると、左右両脚においてターンの間に連動して屈曲運動が行われており、右脚の屈曲伸展角度（図 3.9(b), 図 3.10(b)）は左脚の屈曲伸展角度（図 3.9(a), 図 3.10(a)）よりも角度変化が大きい。この結果は、被験者の利き足である右脚が、左脚よりも大きく運動していることを示している。足関節の結果（図 3.11）においては、スキーブーツによって足首が固定されているため、角度変化が他の関節と比較して小さい結果が得られた。

以上より、第 2 章にて構築した 3 次元姿勢推定法をスキー・ターンの運動計測へ適用することにより、ドリフトによる誤差を補正したスキーヤーの関節角度を示し、スキー・ターンの主要な特徴を示すことができた。

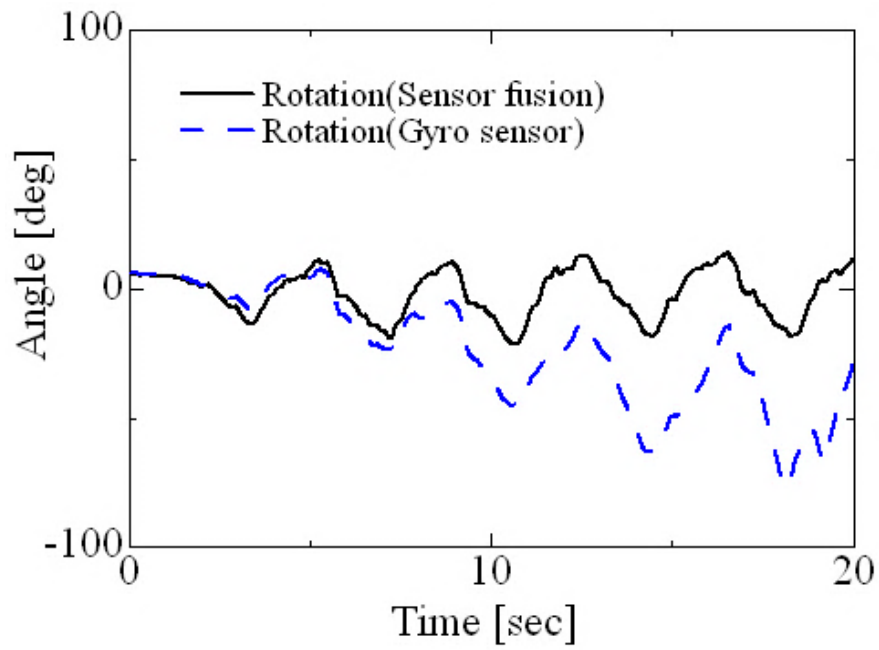


Fig.3.7 Joint angle of lumbar rotation (sensor fusion and gyro sensor)

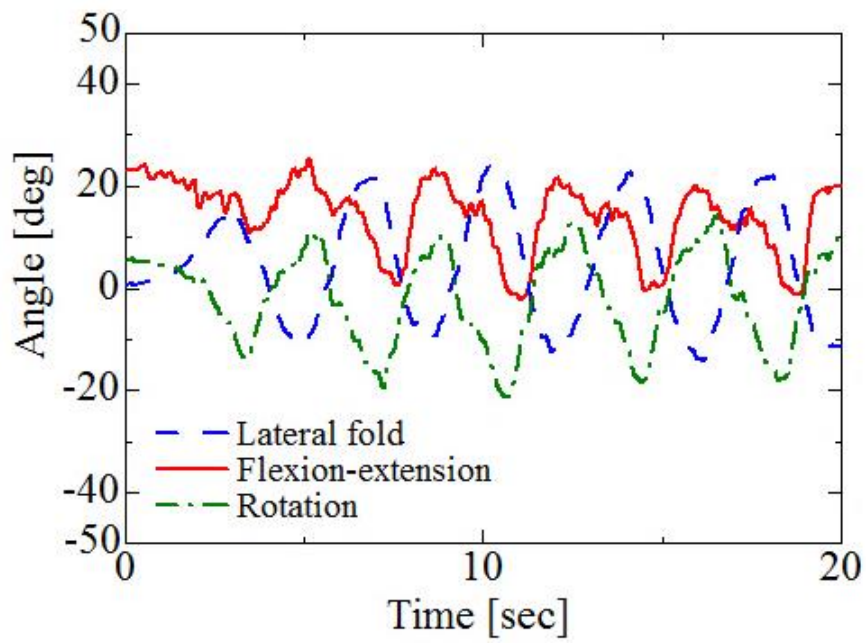
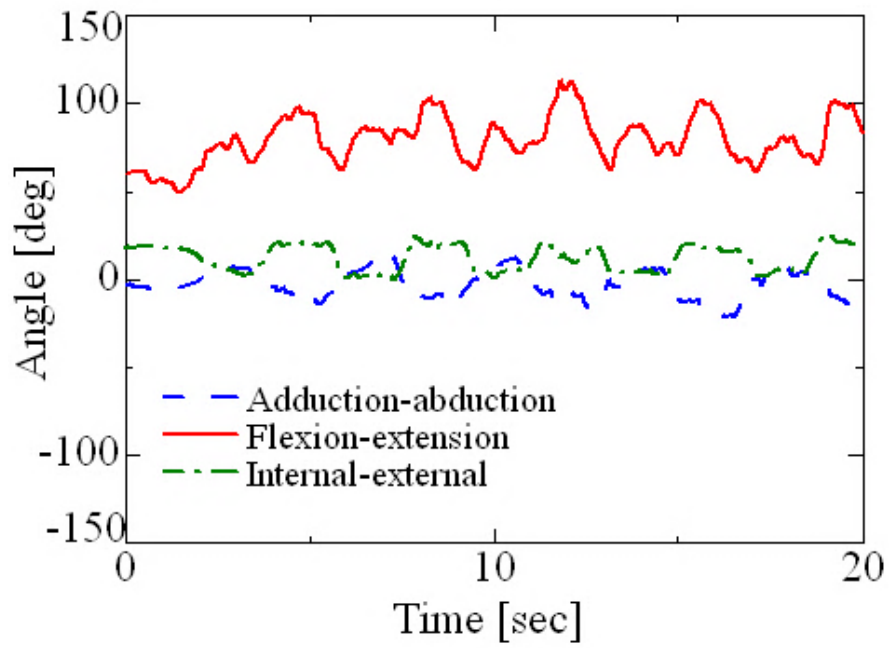
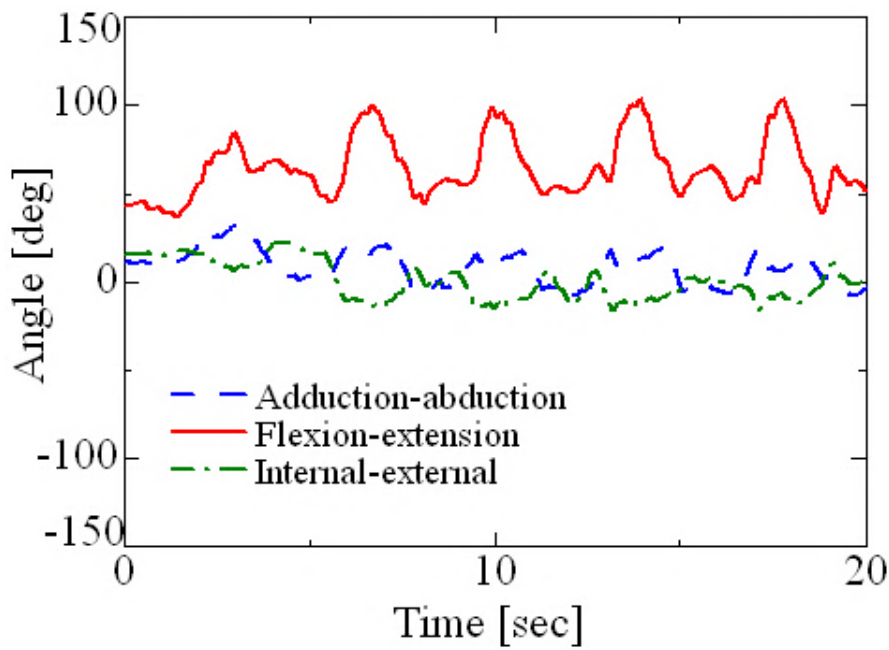


Fig.3.8 Lumbar Joint angle

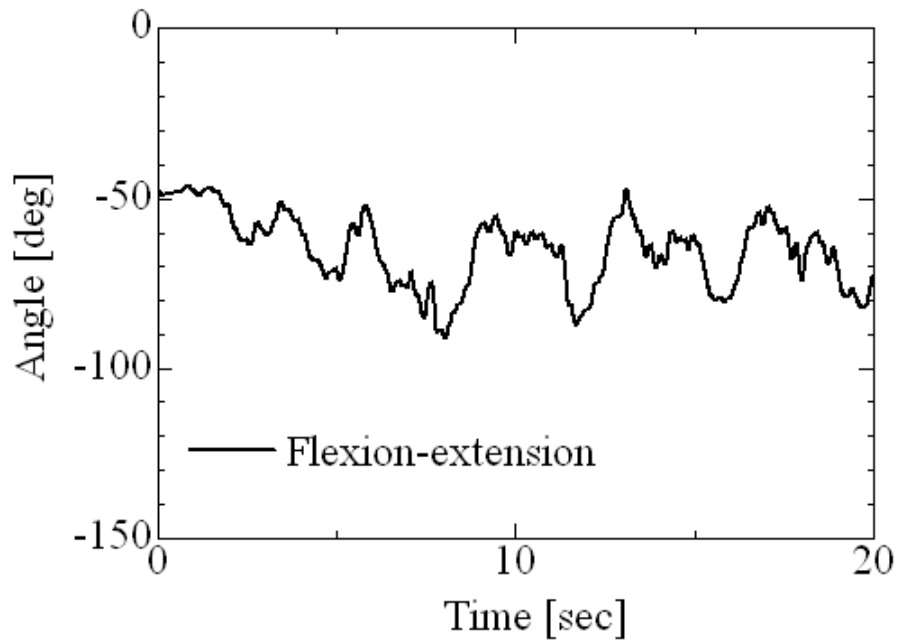


(a) Left hip joint angle

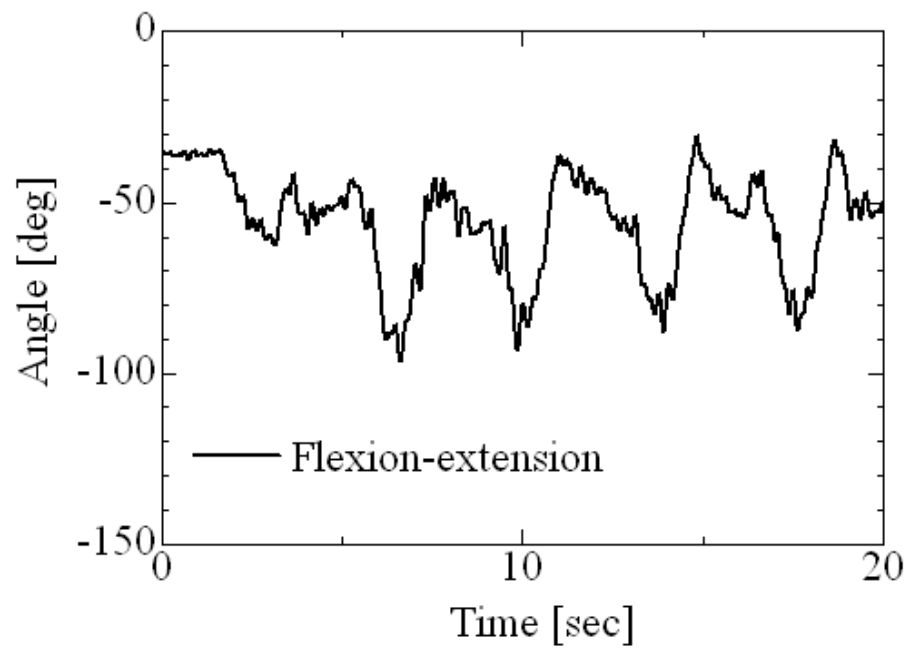


(b) Right hip joint angle

Fig.3.9 Hip joint angles

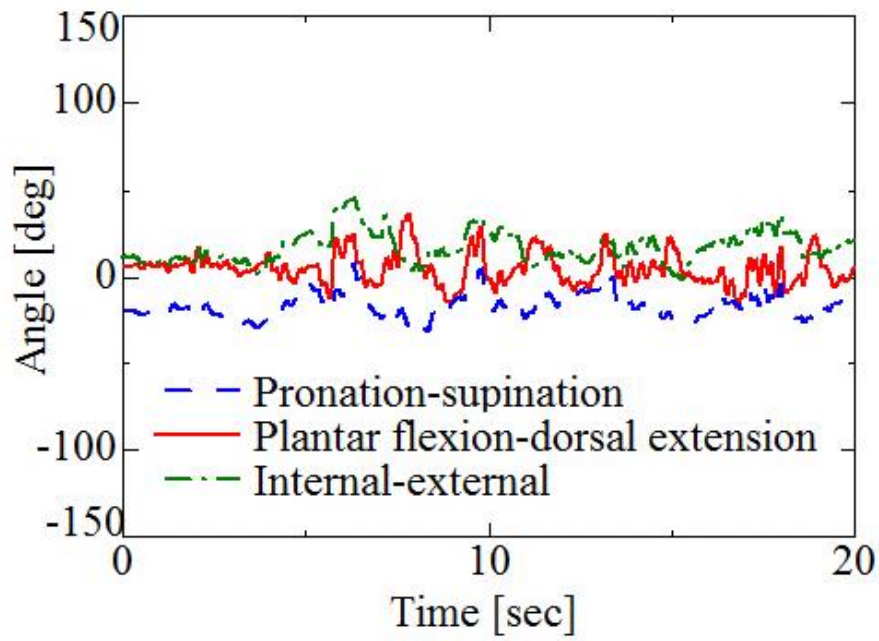


(a) Left knee joint angle

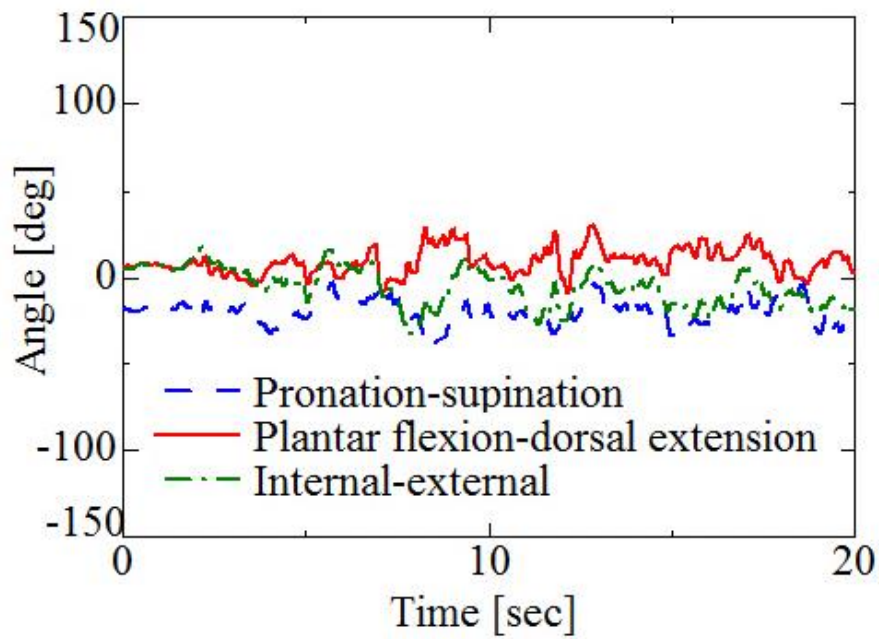


(b) Right knee joint angle

Fig.3.10 Knee joint angles



(a) Left ankle joint angle



(b) Right ankle joint angle

Fig.3.11 Ankle joint angles

3.6 結言

本研究では、実際の雪面においてカービングターンを行うスキーヤーによる計測実験を行い、得られた情報に第 2 章にて構築した慣性センサを用いた 3 次元姿勢推定法を適用することにより、スキーヤーの 3 次元姿勢計測を行った。実験の結果、ドリフトによる誤差を補正したスキーヤーの関節角度を示すことができ、本解析法の有効性を示した。

本方法は並進加速度による影響に対応しているため、高速なターンを行うスキーヤーの運動解析を行うことが可能である。さらに、本方法をスキー・ターンの運動計測へ適用することにより、スキー・ターン中の運動の主要な特徴を解析することができ、より理想的なターン・フォームの提案やスキルの評価への応用が期待できる。

3.7 参考文献

- (1) 佐橋稔雄, 古田拓, 冬季オリンピック (1992)・仏・アルペールビル・スラローム選手の「滑走速度と滑降方法」について, 選手による違い (上・下), 日本スキー学会誌, 第 23 巻第 1 号, 53 頁~76 頁 (2013)
- (2) 星野宏司, 角田和彦, 佐々木敏, 蓑内豊, 武田秀勝, アルペンスキー選手における無酸素性パワーの発揮特性について, スキー研究, 第 10 巻第 1 号, 47 頁~53 頁 (2013).
- (3) 清水史郎, 土岐仁, 野尻奈央子, 受動型横ずれターンモデルの開発—股関節の外転・内転と股関節の内旋による複合モデル—, スキー研究, 第 9 巻第 1 号, 29 頁~33 頁 (2012).
- (4) 清水史郎, 土岐仁, 山根真紀, 野尻奈央子, 受動型横ずれターンモデルの開発—股関節の回旋によるプルークボーゲン—, スキー研究, 第 10 巻第 1 号, 13 頁~18 頁 (2013).
- (5) 池上康男, 桜井信二, 矢部京之助, DLT 法, Japan Journal of Sport Science, 第 10 巻第 3 号, 191 頁~195 頁 (1991).
- (6) 塩野谷明, 畠圭祐, 西條暁里, 今村啓, 山本晋平, 実滑走時のスキー振動とヒト EMG の同時計測システムの構築, 日本スキー学会誌, 第 20 巻第 1 号, 83 頁~90 頁 (2010).
- (7) 塩野谷明, 監物勇介, 西條暁里, スキー実滑走中の機械力学振動およびヒト EMG (Electromyography) の同時計測システムによるスキー板の振動とヒト EMG の相互相関分析の試み, スキー研究, 第 10 巻第 1 号, 1 頁~11 頁 (2013).
- (8) Yoneyama, T., Scott, N., Kagawa, H., and Osada, K., Ski deflection measurement during skiing and estimation of ski direction and edge angle, Sports Engineering, 11, pp.3-13 (2008).
- (9) 巖見武裕, 桜井裕樹, 土岐仁, スキー滑走における生体負荷の解析手法, 日本機械学会論文集 C 編, 第 68 巻第 666 号, 562 頁~568 頁 (2002).
- (10) 土岐仁, 穂苺真樹, 小林義隆, スキー滑走フォームの運動解析と計測に関する研究, 日本機械学会 Dynamic & Design Conference 2005, 515-1 頁~515-5 頁 (2005).
- (11) 廣瀬圭, 土岐仁, 佐藤伸幸, 村田浩, スキーヤーの姿勢・滑走軌跡を用いたスキー・ターンの運動解析に関する研究, スキー研究, 第 8 巻第 1 号, 21 頁~27 頁 (2011).

- (12) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, スキーヤーの関節角度・滑走速度計測によるスキー・ターンの運動解析に関する研究, スポーツ産業学研究, 第22巻第1号, 1頁~8頁 (2012).
- (13) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 永作清, 拡張カルマンフィルタを用いたスキー・ターンの運動計測と力学解析に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 第77巻第774号, 470頁~480頁 (2011).
- (14) 谷萩隆嗣, カルマンフィルタと適応信号処理, コロナ社:東京, 47頁~59頁 (2005).
- (15) 廣瀬圭, 土岐仁, スノーボード・ターンの運動計測と解析に関する研究, スキー研究, 第7巻第1号, 27頁~34頁 (2010).
- (16) 吉川恒夫, ロボット制御基礎論, コロナ社:東京, 86頁~94頁 (1988).

第 4 章

慣性センサを用いたカービングターン、スキッディングターンの運動学的解析

The purpose of this study is the motion analysis of ski turns and the 3D posture measurement of skier in gliding on the actual snow field. The measurement system consists of the inertial sensor (the 3-axis gyro sensor and the 3-axis acceleration sensor) and measures the 3-axis angular velocity and the 3-axis acceleration.

We established the motion measurement method that estimates the 3D posture (Roll-Pitch-Yaw angles) in local coordinate system using the inertial sensor output. This method can compensate the drift error of gyro sensor output and avoid the effect of dynamic acceleration by applying the Unscented Kalman filter. Therefore, the method can be used to measure the motion of skier gliding on the actual snow field at high speed.

We conducted the measurement experiment of carving and skidding turns by the skier gliding on the actual snow field. The measurement systems were attached to the body segments (upper body, lumber, upper thighs and lower thighs) of skier and the ski boots. The joint angles (lumber, hips, knees and ankles) of skier were calculated by applying the 3D posture to the inverse kinematics. The results of measurement experiment indicated quantitatively the joint angles of skier, and the analysis results represented the major features of skier in carving and skidding turns.

4.1 諸言

スキーは、用具の進化や技術の向上と共に発展しているスポーツである。スキー用具に着目した研究として、クロスカンリースキーにおけるポール技術評価に関する研究⁽¹⁾、スキー板の特性変化に関する研究⁽²⁾、スキーブーツの剛性・曲げ性状に関する研究⁽³⁾などが行われており、スキーの運動計測に関する研究として、スキーロボットの開発⁽⁴⁾、スキー・ターンのシミュレーションに関する研究⁽⁵⁾、スキー板の雪面反力計測に関する研究⁽⁶⁾⁽⁷⁾、スキーヤーの運動解析に関する研究⁽⁸⁾等が行われている。

スキー・ターンのメカニズムを解明するためには、実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動を解析することが重要であり、実滑走におけるスキーヤーの運動計測に関する研究として、慣性センサ（ジャイロセンサ、加速度センサ）・地磁気センサを搭載した計測システムから得られる情報にセンサ・フュージョンを適用し、ジャイロセンサに含まれるドリフトによる誤差を補正した関節角度の推定⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が行われている。慣性センサは被験者の身体に直接取り付けることができ、簡易な計測が可能であることから、計測範囲が広いスノースポーツの運動に適しているが、慣性センサの情報から正確な姿勢情報を得るためには、運動の特徴を考慮し、センサに含まれる誤差を補正可能な姿勢推定法を構築する必要がある。スキーは広大な範囲を滑走することから、加速度センサが検出する動的加速度が大きいことを考慮し、2つの計測システムの情報を用いて動的加速度の影響を低減させる方法⁽¹¹⁾が提案されているが、高速なスキー滑走においては十分な補正ができず、精度が低下する可能性がある。

本論文では、第2章にて、動的加速度に対応し、高速な滑走においても使用可能な運動計測法を構築⁽¹²⁾し、第3章にて実際の雪面においてカービングターンを行うスキーヤーの関節角度推定を行った⁽¹³⁾。しかし、この研究では、計測時間全体におけるスキーヤーの関節角度を定量化したのみであり、より詳細な運動を捉えるためには、1ターン分の運動に着目した解析を行う必要がある。また、先行研究ではカービングターンのみの解析を行っているが、異なる種類のターンの解析を行うことにより、ターン種類による運動の違いを示すことができる。

以上より、本研究では、慣性センサを取り付けたスキーヤーによる、異なる種類のターン（カービングターン、スキッディングターン）の計測実験を行う。そして、1ターン分の運動を抽出した2種類のターン結果を比較・解析することにより、ターンの違いによる運動の特徴を明らかにする。

4.2 計測システム

本研究で用いる計測システムを図 4.1 に示す。計測システムには、ジャイロセンサ (ANALOG DEVICES, ADIS16100), 3 軸加速度センサ (日立金属, H30CD) が搭載されている。ジャイロセンサは 3 軸直交配置されており, 本計測システムは 3 軸の角速度, 加速度を計測することができる。計測した情報は, PIC マイクロコントローラ (PIC16F88) により収集し, シリアル通信によって PC へ送られる。本計測システムの大きさは $65 \times 45 \times 25 \text{mm}$, 重さは 65g である。

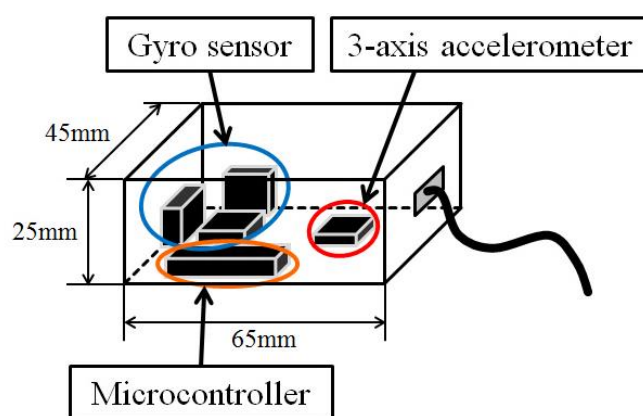


Fig.4.1 Measurement system

4.3 姿勢推定法

本研究では、第2章にて構築した3次元姿勢推定法を用いる。本方法は、アンセンテッドカルマンフィルタを用いてジャイロセンサのドリフトによる誤差を補正した相対座標系の姿勢情報（ロール・ピッチ・ヨー角）を推定する。ロール・ピッチ・ヨー角は、 z 軸→ y 軸→ x 軸の順に各軸を回転させたものと定義する。本方法は、図4.2に示す2リンクモデルにおける角速度、加速度の関係を用いて構成しており、本方法における非線形状態方程式、非線形観測方程式を式(4.1)、式(4.2)にそれぞれ示す。

$$x_{t+1} = F(x_t) + w_t \quad (4.1)$$

$$y_t = H(x_t) + v_t \quad (4.2)$$

$$x_t = \begin{bmatrix} {}^i\varphi_{i+1} \\ {}^i\theta_{i+1} \\ {}^i\psi_{i+1} \end{bmatrix}, y_t = \begin{bmatrix} {}^iA_p - {}^iA_{ct} \\ {}^{i+1}A_p + {}^{i+1}A_{ct} \end{bmatrix}$$

$$F(x_t) = \begin{bmatrix} {}^i u_x + \sin {}^i\varphi_{i+1} \tan {}^i\theta_{i+1} {}^i u_y + \cos {}^i\varphi_{i+1} \tan {}^i\theta_{i+1} {}^i u_z \\ \cos {}^i\varphi_{i+1} {}^i u_y - \sin {}^i\varphi_{i+1} {}^i u_z \\ \sin {}^i\varphi_{i+1} \sec {}^i\theta_{i+1} {}^i u_y + \cos {}^i\varphi_{i+1} \sec {}^i\theta_{i+1} {}^i u_z \end{bmatrix}$$

$$H(x_t) = \begin{bmatrix} {}^iR_{i+1}({}^{i+1}A_p + {}^{i+1}A_{ct}) \\ {}^iR_{i+1}^T({}^iA_p - {}^iA_{ct}) \end{bmatrix}$$

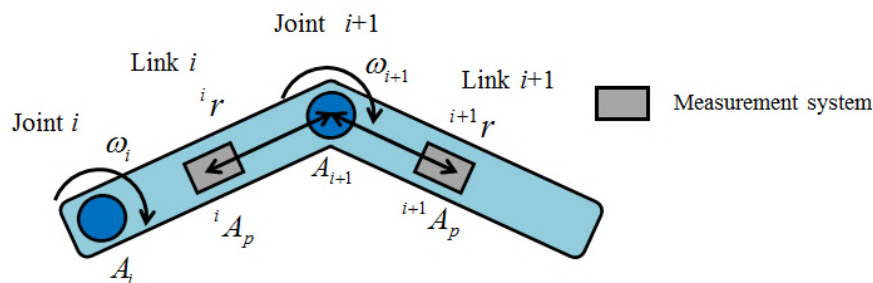


Fig.4.2 2 link model

ここで, w_i, v_i は白色雑音である. 推定値 $x(i)$ は相対座標系のロール・ピッチ・ヨー角 (${}^i\varphi_{i+1}, {}^i\theta_{i+1}, {}^i\psi_{i+1}$) であり, リンク i とリンク $i+1$ の間の姿勢情報を示している. また, 非線形状態方程式内のシステム行列 $F(x_i)$ は, 関節角速度 ${}^i u$ とロール・ピッチ・ヨー角との関係式 (式 (4.3)) によって構成され, 関節角速度は, リンク i の角速度 ${}^i\omega$ とリンク $i+1$ の角速度 ${}^{i+1}\omega$ を用いて式(4.4)より算出する.

$$\begin{bmatrix} {}^i\dot{\psi}_{i+1} \\ {}^i\dot{\theta}_{i+1} \\ {}^i\dot{\varphi}_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin^i\varphi_{i+1}\sec^i\theta_{i+1} & \cos^i\varphi_{i+1}\sec^i\theta_{i+1} \\ 0 & \cos^i\varphi_{i+1} & -\sin^i\varphi_{i+1}\tan^i\theta_{i+1} \\ 1 & \sin^i\varphi_{i+1}\tan^i\theta_{i+1} & \cos^i\varphi_{i+1}\tan^i\theta_{i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^i u_x \\ {}^i u_y \\ {}^i u_z \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^i u = {}^i\omega - {}^{i-1}R_i^T {}^{i-1}\omega \quad (4.4)$$

ここで, ${}^iR_{i+1}$ はリンク $i+1$ 座標系からリンク i 座標系へ変換する回転行列であり, 式(4.5)より表される.

$$\begin{aligned} {}^iR_{i+1} &= R({}^i\psi_{i+1}) \cdot R({}^i\theta_{i+1}) \cdot R({}^i\varphi_{i+1}) \\ &= \begin{bmatrix} \cos^i\psi_{i+1} & -\sin^i\psi_{i+1} & 0 \\ \sin^i\psi_{i+1} & \cos^i\psi_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos^i\theta_{i+1} & 0 & \sin^i\theta_{i+1} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin^i\theta_{i+1} & 0 & \cos^i\theta_{i+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^i\varphi_{i+1} & -\sin^i\varphi_{i+1} \\ 0 & \sin^i\varphi_{i+1} & \cos^i\varphi_{i+1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.5)$$

観測値 y_i は, 関節における並進加速度と重力加速度との和であり, 非線形観測方程式のシステム行列 $H(x_i)$ は, 関節 $i+1$ における加速度の関係によって構成される. ${}^iA_p, {}^{i+1}A_p$ はリンク i , リンク $i+1$ に取り付けられた加速度センサの出力, ${}^iA_{ct}, {}^{i+1}A_{ct}$ はリンク i , リンク $i+1$ における遠心加速度と接線加速度の和であり, ${}^iA_{ct}, {}^{i+1}A_{ct}$ は角速度 ${}^i\omega$, 角加速度 ${}^i\dot{\omega}$, 加速度センサから関節 i までの位置ベクトル ${}^i r$ を用いて式(4.6)より表される.

$${}^iA_{ct} = {}^i\omega \times {}^i\omega \times {}^i r + {}^i\dot{\omega} \times {}^i r \quad (4.6)$$

以上より得られた非線形状態方程式, 非線形観測方程式をアンセンテッドカルマンフィルタに適用し, 姿勢情報を推定する. センサ・フュージョンのブロック線図を図 4.3 に示す.

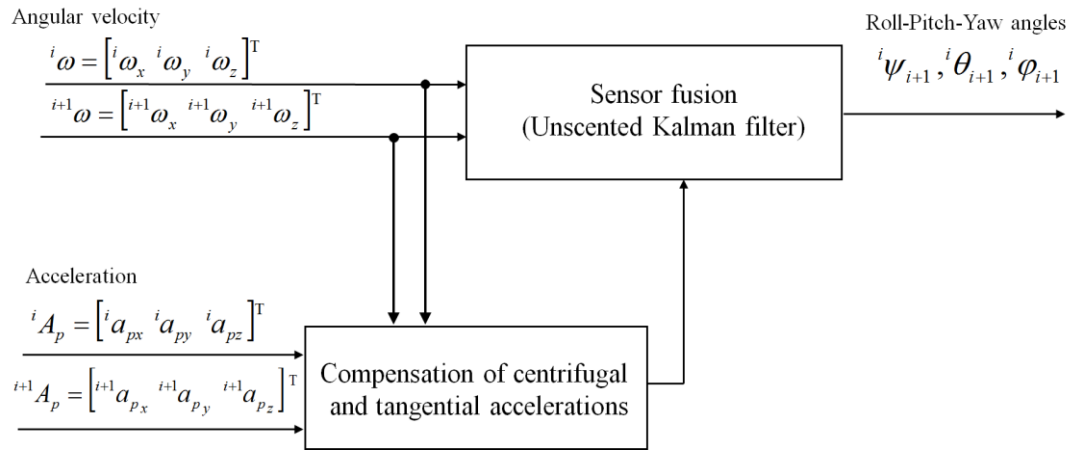


Fig.4.3 Block diagram for estimation of 3D posture

4.4 運動解析法

本研究では、実際の雪面においてカービングターン、スキッピングターンを行うスキーヤーの関節角度を用いた運動解析を行う。関節角度は、第3章と同様に、3次元剛体リンクモデル⁽¹⁴⁾に推定した姿勢情報を適用することにより算出する。本研究で用いる3次元剛体リンクモデルと座標系を図4.4に示す。本モデルは腰椎関節、左右股関節、左右膝関節、左右足関節から成り、スキーヤーの上体部と腰部にとりつけた計測システムが成す角度を腰椎関節としている。座標系は、スキーヤーの進行方向をX軸とした右手座標系とし、各軸周りの回転方向は反時計回りを正方向とした。ここで、腰椎関節を3自由度、股関節を3自由度、膝関節を1自由度、足関節を3自由度と定義している。各関節情報を表4.1に示す。なお、 Ψ は内外旋角度、回旋角度、回内外角度、 θ は屈曲伸展角度、底屈背屈角度、 Φ は側屈角度、内外転角度、内外反角度をそれぞれ示している。

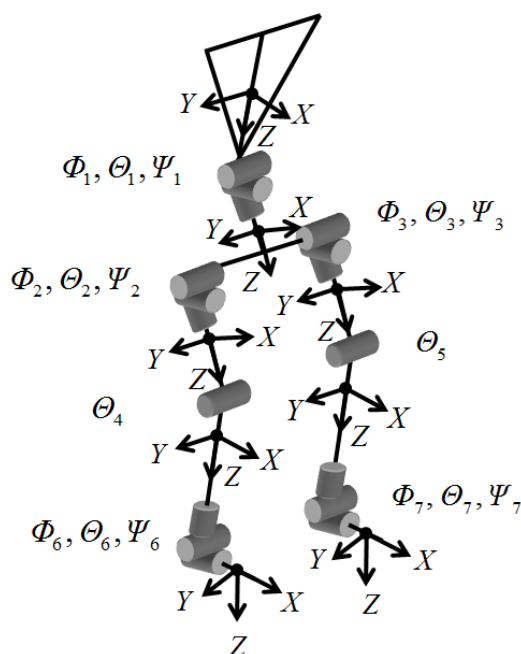


Fig.4.4 3D rigid link model

Table 4.1 Definition of joint for rigid link model

Φ_1	Lumber lateral fold to left (+) to right (-)
Θ_1	Lumber extension (-) flexion (+)
Ψ_1	Lumber left rotation (-) right rotation (+)
Φ_2	Right hip adduction (+) abduction (-)
Θ_2	Right hip extension (-) flexion (+)
Ψ_2	Right hip internal rotation (-) external rotation (+)
Φ_3	Left hip extension (-) flexion (+)
Θ_3	Left hip adduction (-) abduction (+)
Ψ_3	Left hip internal rotation (-) external rotation (+)
Θ_4	Right knee flexion (-) extension (+)
Θ_5	Left knee flexion (-) extension (+)
Φ_6	Right lower thigh pronation (+) supination (-)
Θ_6	Right foot plantar flexion (-) dorsal flexion (+)
Ψ_6	Right foot varus (+) valgus (-)
Φ_7	Left lower thigh pronation (-) supination (+)
Θ_7	Left foot plantar flexion (-) dorsal flexion (+)
Ψ_7	Left foot varus (-) valgus (+)

本研究では、計測システムをスキーヤーの上部、腰部、左右大腿部、左右下腿部、左右足部の計8カ所に取り付ける。計測システムの設定位置を図4.5に示す。

得られた3次元姿勢情報を、式(4.7)より相対座標系の回転行列へ変換し、その後逆運動学⁽¹⁵⁾を適用することにより、各関節角度を算出する。関節角度は、スキーヤーの運動を考慮し、Y軸（屈曲伸展角度、底屈背屈角度）→Z軸（内外旋角度、回旋角度、回内外角度）→X軸（側屈角度、内外転角度、内外反角度）の順で回転させたものとし、 Ψ 、 Θ 、 Φ はそれぞれ式(4.8)～(4.10)を用いて算出する。

$${}^i R_{i+1} = \begin{bmatrix} \cos^i \psi_{i+1} & -\sin^i \psi_{i+1} & 0 \\ \sin^i \psi_{i+1} & \cos^i \psi_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos^i \theta_{i+1} & 0 & \sin^i \theta_{i+1} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin^i \theta_{i+1} & 0 & \cos^i \theta_{i+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^i \varphi_{i+1} & -\sin^i \varphi_{i+1} \\ 0 & \sin^i \varphi_{i+1} & \cos^i \varphi_{i+1} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\Psi = \text{atan} \frac{R_{21}}{R_{22}} \quad (4.8)$$

$$\Theta = \text{atan} \frac{R_{13}}{R_{33}} \quad (4.9)$$

$$\Phi = \text{atan} \frac{-R_{23}}{\sqrt{R_{21} \cdot R_{21} + R_{22} \cdot R_{22}}} \quad (4.10)$$

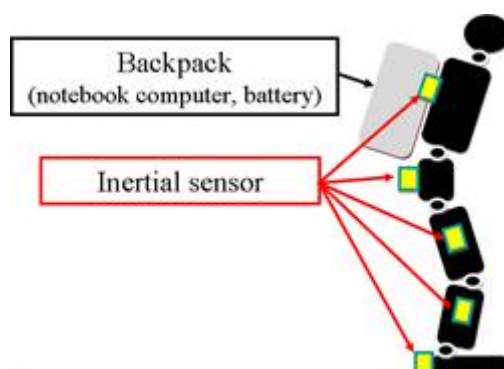


Fig.4.5 Setting positions of measurement systems

4.5 計測実験

4.5.1 実験方法

計測システムをスキーヤーの各身体部位に取り付け、計測実験を行った。被験者は、年齢 23 歳、身長 180cm、体重 70kg、スキー歴 17 年の男性であり、全日本スキー連盟準指導員資格を有している。被験者には事前に実験方法や安全性についての十分な説明を行い、実験に参加する同意を得た。スキーヤーは、平均斜度 10 度のコースを、助走を行った後に、ターンを繰り返し行いながら滑走した。ターンの種類による運動の違いを示すため、カービングターン、スキッピングターンの 2 種類の滑走を行った。本実験における計測時間は 30 秒、サンプリング周波数は 100Hz であり、使用したスキー板の長さは 165cm である。

なお、本研究では、左ターン、右ターンを合わせて 1 ターンと定義しており、ターンの概要を図 4.5 に示す。ターン切替期は、地磁気センサから得られる方位情報を用いた滑走情報推定法⁽¹⁶⁾を用いて推定した。

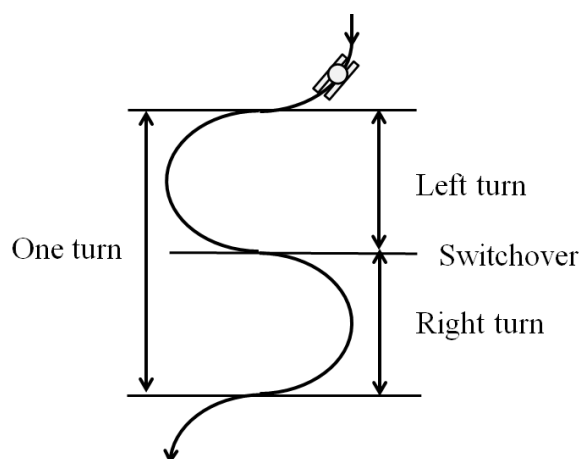


Fig.4.6 Description of one turn

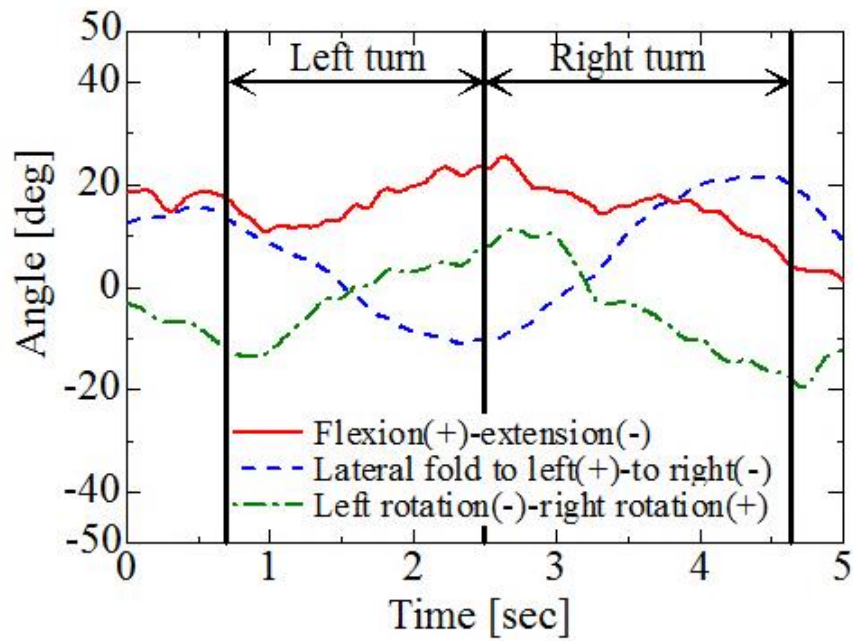
4.5.2 実験結果

計測実験によって得られた運動情報より推定した各関節角度の結果を図4.7～図4.13に示す。実験結果は、運動解析を行うために、1ターン分を抽出しており、縦の実線はターン切替期を示している。

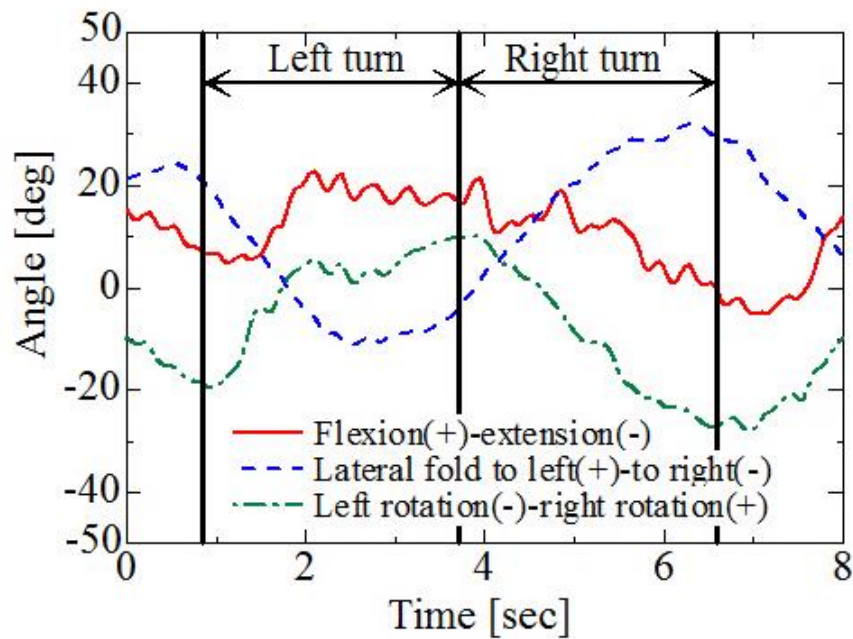
カービングターン、スキッピングターンの結果における関節角度の大きさについて考察する。腰椎関節(図4.7)に着目すると、両ターンの結果ともに左ターン中は右側屈運動、右回旋運動、右ターン中は左側屈運動、左回旋運動が行われており、スキッピングターンにおいて、より大きい角度が得られている。この結果は、スキー板の横ずれを発生させるために、カービングターンよりも大きく下半身をターン中心部へ傾斜させながら、ひねり運動を行っていることを示している。股関節(図4.8, 4.9)においては、両ターンの結果ともに左ターン中に左股関節の屈曲運動、右ターン中に右股関節の屈曲運動が行われており、エッジング量を発生させるために内足の股関節を深く屈曲させていることを示している。膝関節(図4.10, 4.11)においては、両ターンともに股関節角度と連動した結果が得られた。また、スキッピングターンの結果に着目すると、左ターン後半に伸展運動が行われ、右ターン後半には、左ターン時よりは小さいが、伸展運動が行われている。これらの結果は、スキー板の横ずれを発生させるために、膝関節を伸展運動させ、雪面に力を発生させていることを示している。足関節(図4.12, 4.13)においては、スキーブーツによって固定されていることから、他の関節よりも角度変化が小さい結果が得られた。また、カービングターンにおいて、ターン中盤に前傾姿勢を保持するために背屈運動が行われており、スキッピングターンでは、左ターン中の右足関節において底屈運動、右ターン中の左足関節において底屈運動が発生している。この結果は、スキー板の横ずれを発生させるために、外足側の足関節を底屈運動させていることを示している。また、すべての関節において、スキッピングターンの結果はカービングターンよりも細かい角度変化が発生しており、スキーヤーがスキー板の横ずれの影響に対応するための運動を行っていることを示している。

次に、カービングターン、スキッピングターンの結果における関節角度の時間変化による違いについて考察する。両ターンの周期を比較すると、カービングターンの方がスキッピングターンよりもターン周期が短い。また、腰椎関節の屈曲運動、右回旋運動と左股関節の屈曲運動、外旋運動において、カービングターンの結果は、左ターンからターン切替期にむけてゆるやかに関節角度を変化させているのに対し、スキッピングターンの結果は左ターン前半に急に角度変化が大きくなっている。この結果は、カービングターンでは滑らかにターンを行っており、スキッピングターンでは、横ずれを発生させるために姿勢を急変させていることを示している。

以上より、実際の雪面を滑走し、カービングターン、スキッピングターンを行うスキーヤーの関節角度を定量化し、その特徴を示した。

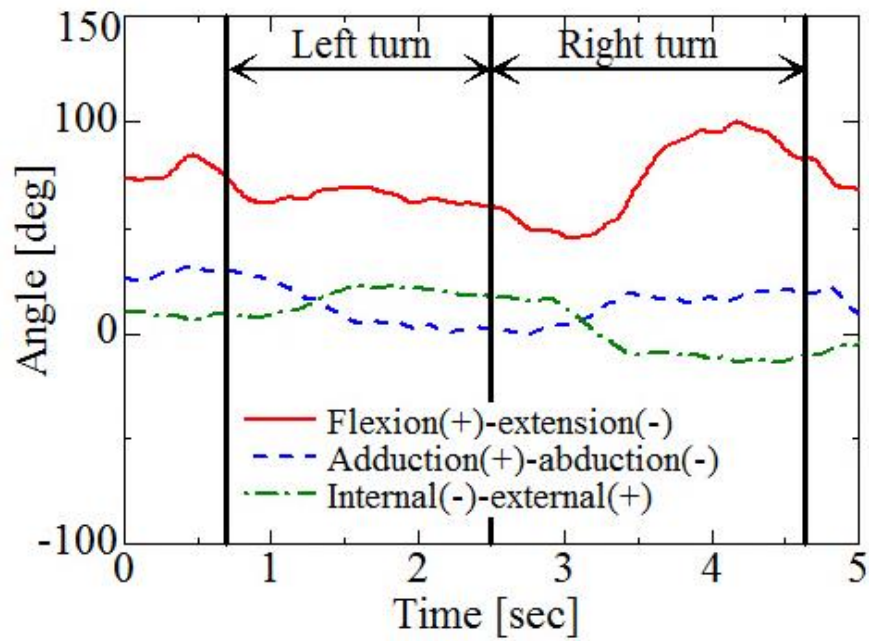


(a) Carving turn

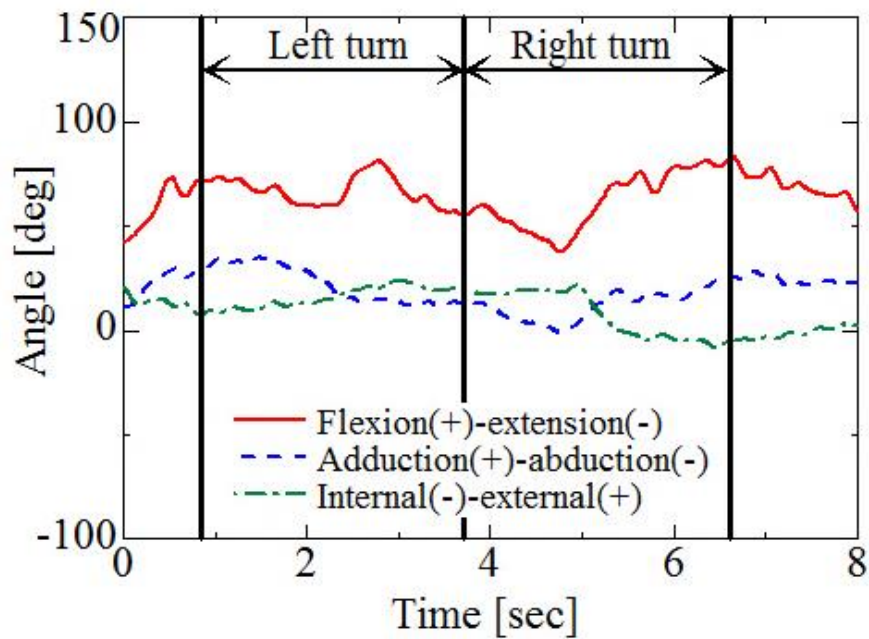


(b) Skidding turn

Fig.4.7 Lumber joint angle

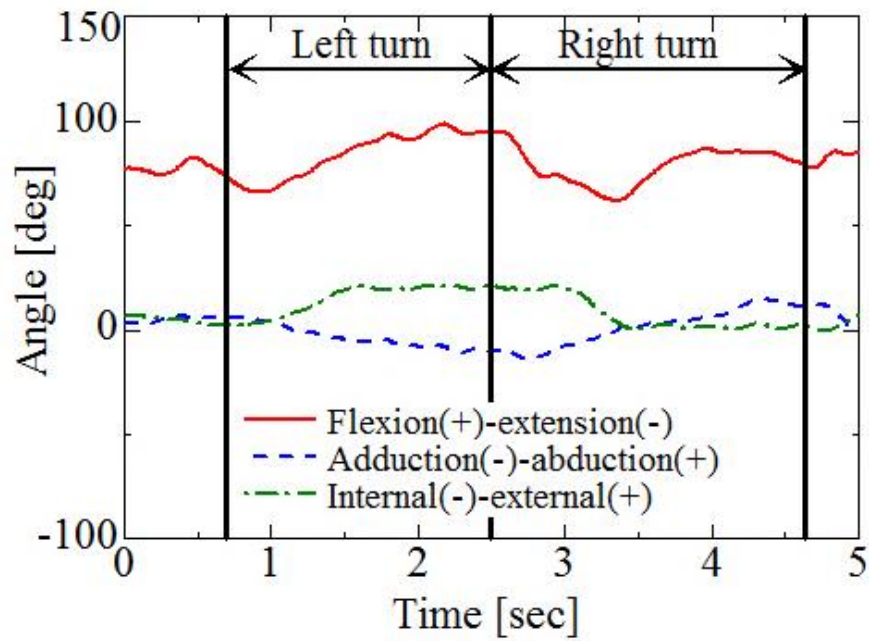


(a) Carving turn

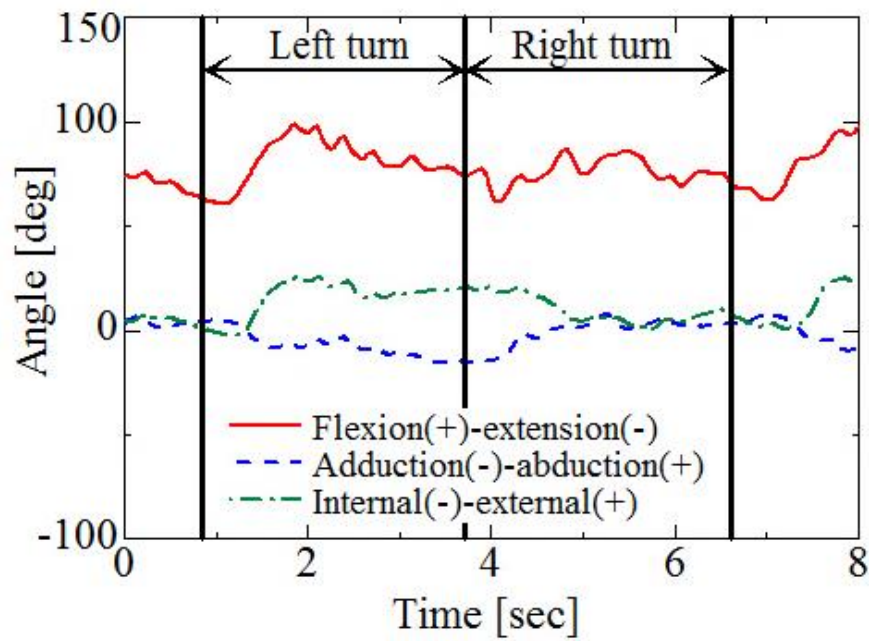


(b) Skidding turn

Fig.4.8 Right hip joint angles

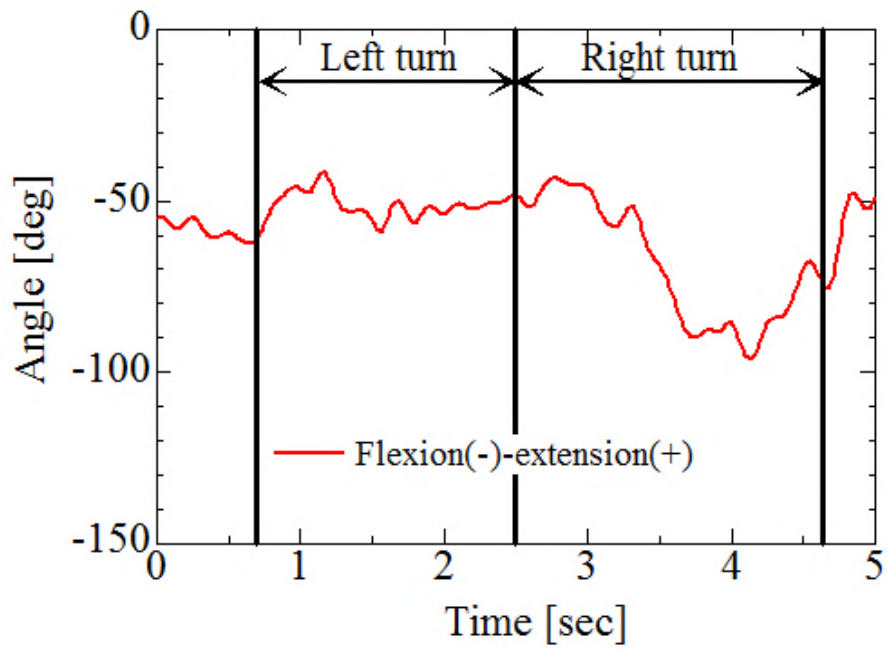


(a) Carving turn

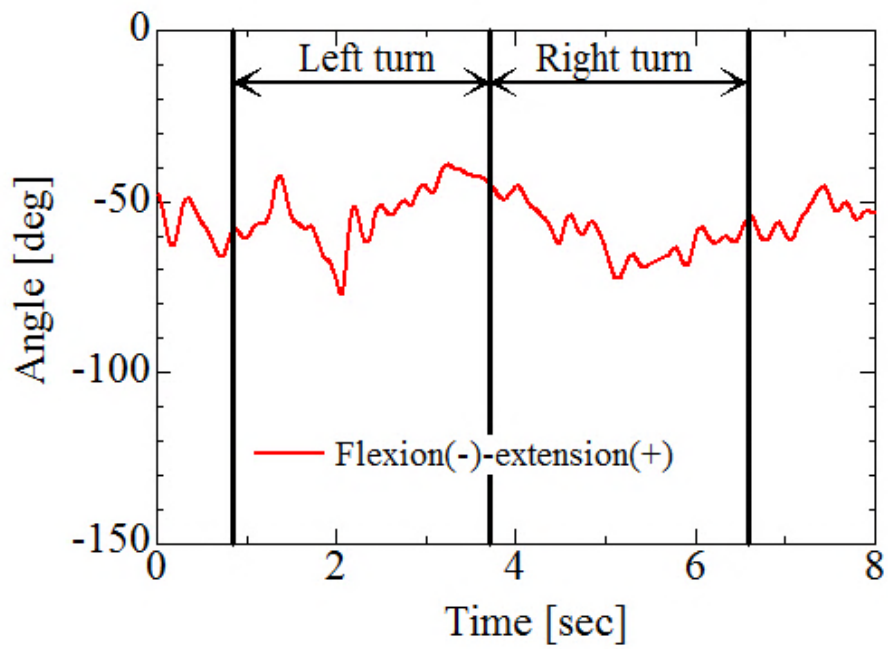


(b) Skidding turn

Fig.4.9 Left hip joint angles

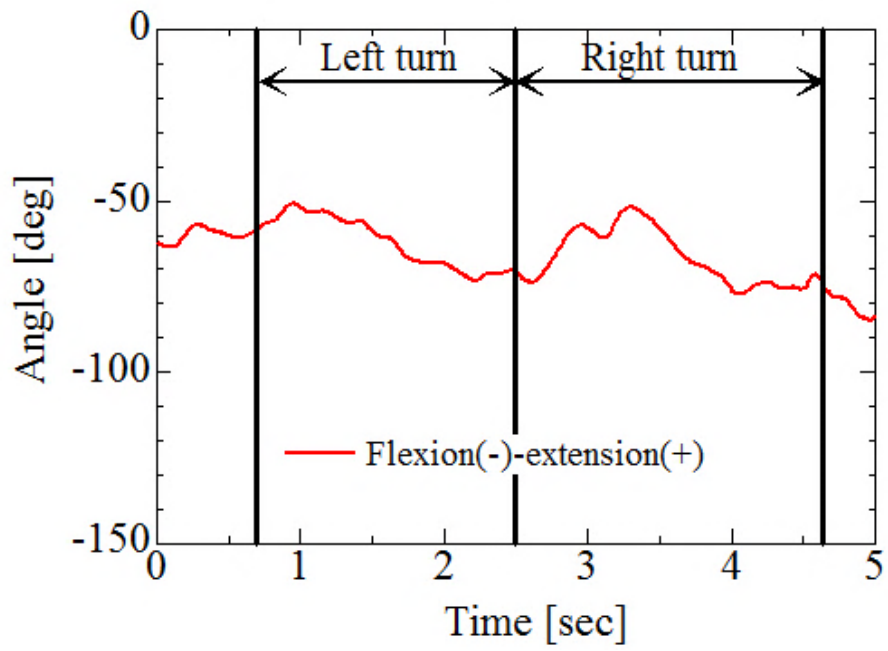


(a) Carving turn

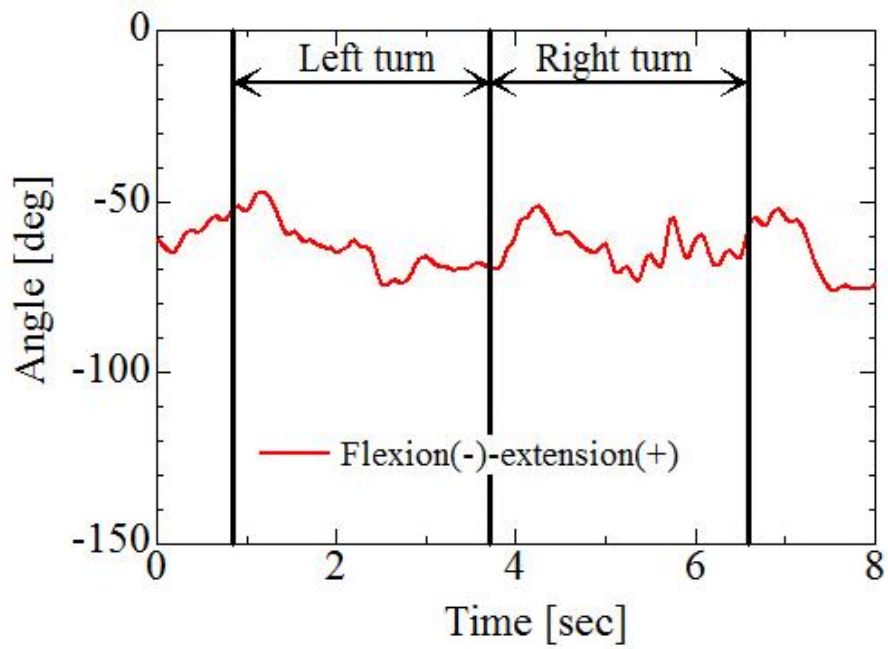


(b) Skidding turn

Fig.4.10 Right knee joint angles

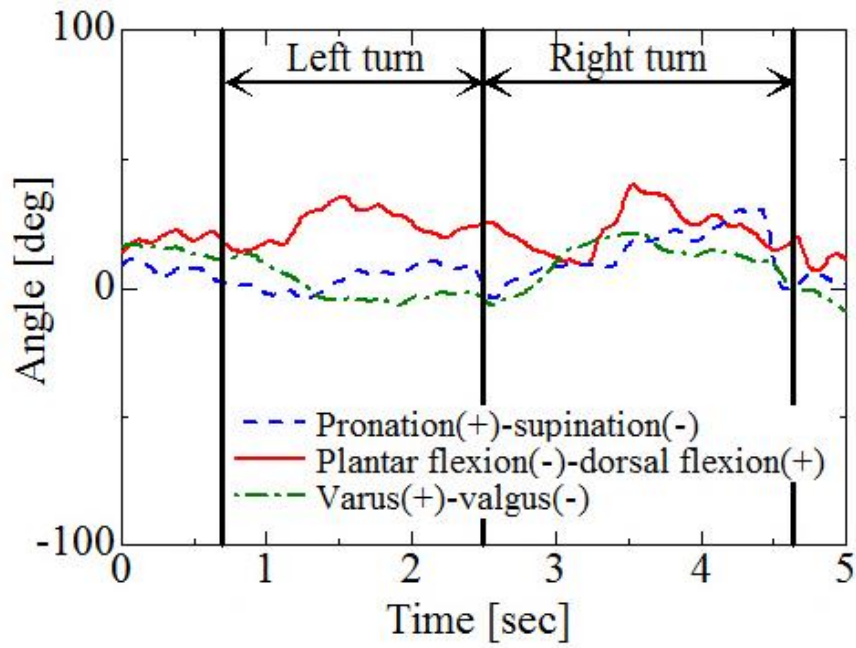


(a) Carving turn

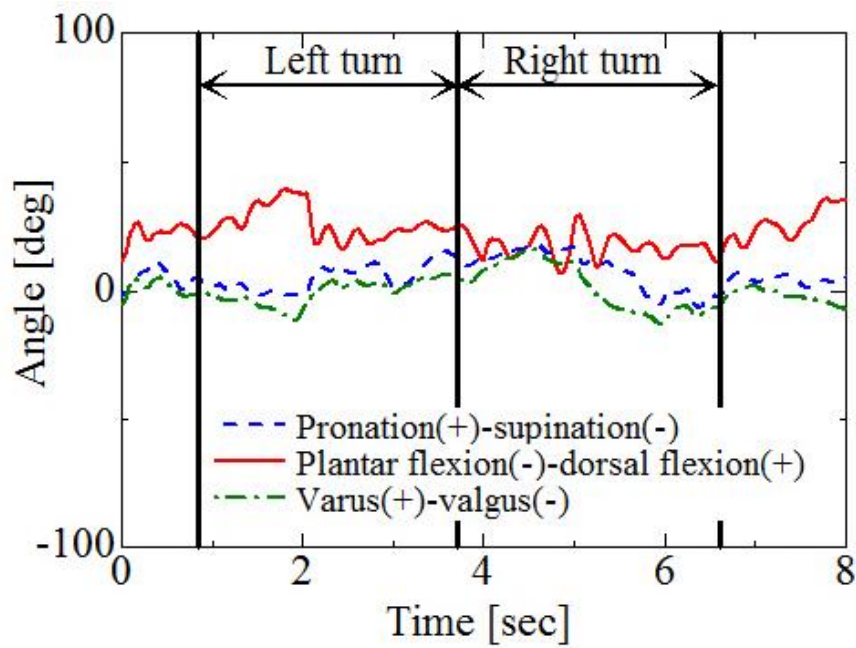


(b) Skidding turn

Fig.4.11 Left knee joint angles

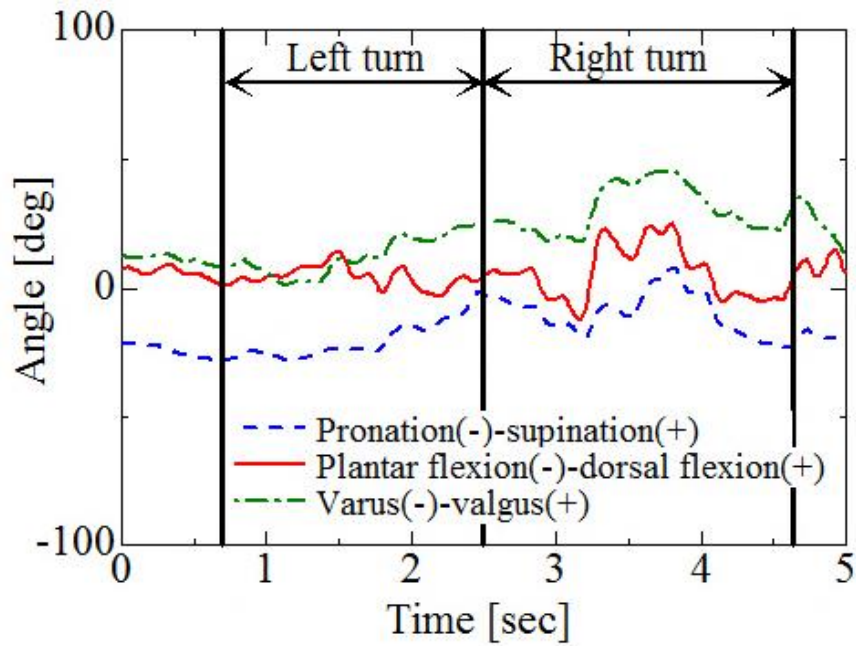


(a) Carving turn

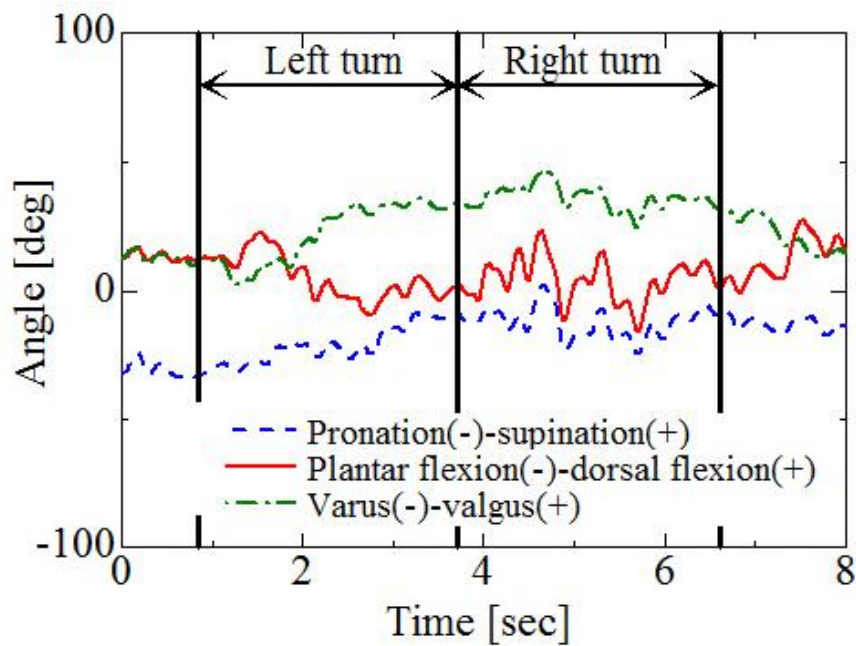


(b) Skidding turn

Fig.4.12 Right ankle joint angles



(a) Carving turn



(b) Skidding turn

Fig.4.13 Left ankle joint angles

4.6 結言

本研究では、実際の雪面においてカービングターン、スキップディングターンを行うスキーヤーによる計測実験を行い、得られた情報に慣性センサを用いた姿勢推定法を適用することにより、スキーヤーの運動計測・解析を行った。関節角度の大きさや時間変化による違いについての解析を行った結果、スキップディングターンにおいて、スキーヤーは横ずれを発生させるために関節角度を急変させており、さらに、発生した横ずれの影響に対応するための運動を行っていることを示した。本方法は、相対座標系の姿勢情報に着目することにより、並進加速度をモデルに組み込んでおり、並進加速度の影響を受けない運動計測が可能であるため、これまで提案されてきた方法では対応しきれない高い並進加速度が発生する運動、即ち、高斜度、高速度における運動計測が可能である。

4.7 参考文献

- (1) Swaren, M., Therell, M., Eriksson, A., Holmberg, A. C., Testing method for objective evaluation of cross-country ski poles, *Sports Engineering*, Vol.16, No.4, pp.255-264 (2013).
- (2) Puukilainen, E., Ohtonen, O., Lemmettyla, T., Linnamo, V., Hemming, B., Laurila, T., Tapio, S., Rasanen, M., Ritala, M., Leskela, M., Changes in the cross-country ski base properties resulting from the ski use, *Sports Engineering*, Vol.16, No.4, pp.229-238 (2013).
- (3) Petrone, N., Marcolin, G., Panizzolo, A. F., The effect of boot stiffness on field and laboratory flexural behavior of alpine ski boots, *Sports Engineering*, Vol.16, No.4, pp.265-280 (2013).
- (4) Yoneyama, T., Kagawa, H., Unemoto, M., Iizuka, T., and Scott, N. W., A Ski robot system for qualitative modeling of the carved turn, *Sports Engineering*, Vol.11, pp.131-141 (2009).
- (5) Federolf, P., Roos, M., Luthi, A., and Dual, J., Finite element simulation of the ski-snow interaction of an alpine ski in a carved turn, *Sports Engineering*, Vol.12, pp.123-133 (2010).
- (6) Yoneyama, T., Kitabe, M., and Osada, K., Investigation on the ski-snow interaction in a carved turn based on the actual measurement, *Procedia Engineering* 2, pp.2901-2906 (2010).
- (7) Scott, N., Yoneyama, T., Kagawa, H., and Osada, K., Measurement of ski snow-pressure profiles, *Sports Engineering*, Vol.10, pp.145-156 (2007).
- (8) Brodie, M., Walmsley, A., Page, M., Fusion motion capture: a prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing, *Sports Technology*, Vol.1, No.1, pp.17-28 (2008).
- (9) 廣瀬圭, 土岐仁, 佐藤伸幸, 村田浩, スキーヤーの姿勢・滑走軌跡を用いたスキー・ターンの運動解析に関する研究, *スキー研究*, 第8巻第1号, 21頁~27頁 (2011) .
- (10) Hirose, K., Doki, H., A proposal for the motion analysis method of skiing turn by the measurement of orientation and gliding trajectory, *The impact of sports technology on sport IV*, pp. 17-22 (2011).

- (11) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 永作清, 拡張カルマンフィルタを用いたスキー・ターンの運動計測と力学解析に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 第77巻第774号, 470頁～480頁(2011).
- (12) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 慣性センサを用いた身体運動計測における3次元姿勢推定法に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 第79巻第803号, 2351頁～2361頁(2013).
- (13) Kondo, A., Doki, H., Hirose, K., An attempt of a new motion measurement method for alpine ski turns using inertial sensors, *The Engineering of Sport* 9, pp.421-426 (2012).
- (14) 廣瀬圭, 土岐仁, スノーボード・ターンの運動計測と解析に関する研究, *スキー研究*, 第7巻第1号, 27頁～34頁(2010).
- (15) 吉川恒夫, *ロボット制御基礎論*, コロナ社, 東京, 86頁～94頁(1988).
- (16) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 慣性センサを用いたスノーボード滑走におけるエッジング量計測法・ターンの運動計測と解析に関する研究, *スキー研究*, 第7巻第1号, 27頁～34頁(2010).

第 5 章

慣性・力覚センサシステムを用いたカービング ターン, スキッディングターンの運動力学解析

The purpose of this study is the dynamic motion analysis of carving and skidding turns by the measurement of skier gliding on the actual snow field. The measurement system consists of the motion measurement systems installing the inertial and magnetic field sensors and the measurement system of reaction force from snow surface installing the 6-axis force sensor. The joint torque of skier is estimated by the information of the measurement systems of motion and reaction force from snow surface. We conducted the measurement experiment of carving and skidding turns by skier gliding on the actual snow field. Then we analyzed the skier's motion using the joint torque. The analysis results indicated the usage for the forces of skier in turns. The proposed method and the analysis results can be used to the detection of ideal turn methods and the evaluation of skier's skill.

5.1 諸言

近年、様々なスポーツにおいて、運動のメカニズム解明、スキル評価のために、運動計測・解析が行われている。スキーにおいても、スキー・ターンのメカニズムを解明するために、実滑走におけるスキーヤーの身体運動計測⁽¹⁾ やスキー板の圧力計測⁽²⁾ 等が行われている。しかし、スキーは広大な雪面を高速で滑走するスポーツであるために計測が難しく、主にスポーツの運動計測に使用されている DLT 法⁽³⁾ を用いた場合、計測範囲を広く設定する必要があるため、精度が十分に得られない可能性がある。簡易な運動計測法として、慣性センサを身体や道具に取り付ける方法が提案されており、ゴルフパットや野球バットのスウィング解析を目的とした計測システム、解析法の開発が行われている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。計測システムをすべて装着することにより、計測範囲による影響を回避可能であるため、慣性センサを用いた方法はスキー・ターンの運動計測に適している。しかし、スキーは他のスポーツよりも比較的長時間の運動計測が必要であるため、スキーヤーの姿勢情報を得るためには、ジャイロセンサのドリフト誤差の影響を無視することができない。

これまでに、身体運動情報と力情報の両面からスキーヤーの運動を明らかにするため、拡張カルマンフィルタを用いたスキーヤーの姿勢計測法、雪面反力計測を併用した力学解析法の提案と、実際の雪面を滑走するスキーヤーの姿勢情報、関節角度、関節トルクの推定が行われている⁽⁶⁾。この方法はドリフト誤差の補正精度を低下させる原因である動的加速度の影響を若干は低減させることが可能であるが、動的加速度が大きい場合には補正精度が低下する。

そこで、本論文では、第 2 章にて相対座標系の運動情報に着目し、動的加速度に対応した姿勢推定法⁽⁷⁾⁽⁸⁾ を構築し、第 3 章、第 4 章にて、カービングターン、スキッディングターンを行うスキーヤーの関節角度推定、運動解析を行うことにより、ターンの違いによる運動の特徴を明らかにした⁽⁹⁾。本方法を利用した力学解析が可能となれば、関節トルクを推定し、さらなる詳細な運動解析が可能となる。

以上より、本研究では、動的加速度に対応した姿勢推定法と雪面反力計測を併用することによる運動力学解析法の提案と実滑走におけるカービングターン、スキッディングターンの運動解析を行い、異なる種類のターンにおけるスキーヤーの運動操作の違いを示す。

5.2 計測システム

本研究では、運動計測システム（図 5.1）、雪面反力計測システム（図 5.2）を用いる。運動計測システムは、ジャイロセンサ（Analog Devevices, ADIS16100）、加速度センサ（日立金属, H30CD）、地磁気センサ（愛知製鋼, AMI304）を搭載しており、スキーヤーの各身体部位に取り付けることにより、身体部位の角速度、装着位置の加速度、磁場を計測する。

雪面反力計測システムには、6軸力センサ（ニッタ, IFS-105M50A220-I63）を搭載しており、スキーブーツとスキー板の間に装着することにより、雪面反力（力、モーメント）を計測する。

これらの計測システムは、すべてスキーヤーのバックパックに搭載した計測用ノート PC に接続されており、同期計測することが可能である。運動計測システム、雪面反力計測システムのサンプリング周波数は 100Hz である。



Fig.5.1 Motion measurement system



Fig.5.2 Measurement system of reaction force from snow surface

5.3 運動解析法

5.3.1 姿勢推定法

第2章にて構築した3次元姿勢推定法⁽⁷⁾⁽⁸⁾を用いて、運動計測システムから得られる情報より、3次元姿勢情報を推定する。姿勢推定のブロック線図を図5.3に示す。本方法を用いることにより、ジャイロセンサのドリフト誤差を加速度センサの並進加速度・重力加速度を用いて補正し、相対座標系におけるロール・ピッチ・ヨー角 (${}^i\varphi_{i+1}$, ${}^i\theta_{i+1}$, ${}^i\psi_{i+1}$) を推定することができる。推定したロール・ピッチ・ヨー角は、関節トルクを推定する逆動力学解析に使用するために、式(5.1)に示す相対座標系の回転行列 ${}^iR_{i+1}$ に変換する。

$$\begin{aligned}
 {}^iR_{i+1} &= R({}^i\psi_{i+1}) \cdot R({}^i\theta_{i+1}) \cdot R({}^i\varphi_{i+1}) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos{}^i\psi_{i+1} & -\sin{}^i\psi_{i+1} & 0 \\ \sin{}^i\psi_{i+1} & \cos{}^i\psi_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos{}^i\theta_{i+1} & 0 & \sin{}^i\theta_{i+1} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin{}^i\theta_{i+1} & 0 & \cos{}^i\theta_{i+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos{}^i\varphi_{i+1} & -\sin{}^i\varphi_{i+1} \\ 0 & \sin{}^i\varphi_{i+1} & \cos{}^i\varphi_{i+1} \end{bmatrix} \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

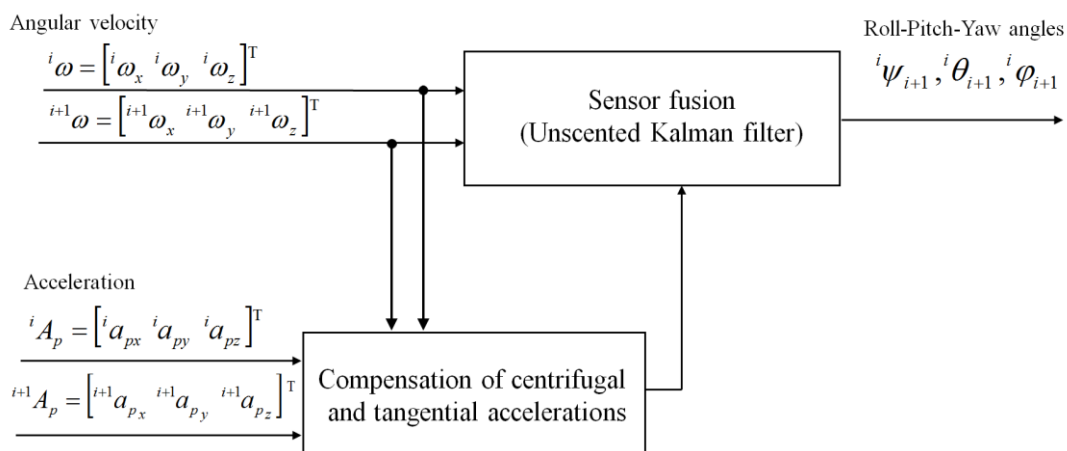


Fig.5.3 Block diagram for estimation of the 3D posture

5.3.2 運動力学解析法

本研究では、第3章、第4章と同様に、スキーヤーを腰椎関節、左右股関節、左右膝関節、左右足関節から成る3次元剛体リンクモデル⁽¹¹⁾と仮定し、腰椎関節、股関節、足関節を3自由度、膝関節を1自由度と定義している。なお、本研究では上体部と腰部に取り付けた運動計測システムの間関節を腰椎関節と定義した。3次元剛体リンクモデルとスキーヤー座標系を図5.4に示す。スキーヤー座標系は、各身体部位の座標系であり、スキーヤーの進行方向をX軸とした右手座標系とし、各軸周りの回転方向は反時計回りを正方向とした。

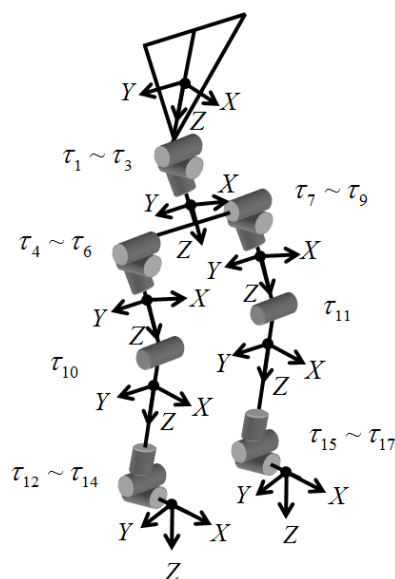


Fig.5.4 3D rigid link model

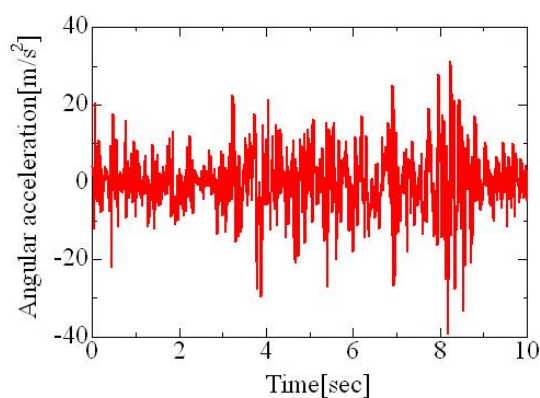
本研究では、スキーヤーの関節トルク ($\tau_1 \sim \tau_{17}$) を推定するために、ニュートン・オイラー法⁽¹²⁾を用いる。ニュートン・オイラー法は、絶対座標系による方法と相対座標系による方法が提案されており、相対座標系による方法のほうが、計算量が少ない。先行研究⁽⁶⁾では、絶対座標系における姿勢情報を推定しており、スキーヤーの各身体部位における絶対座標系の回転行列を算出した後に、相対座標系の回転行列に変換しているため、変換の際にそれぞれの回転行列に含まれる誤差が蓄積してしまう可能性がある。しかし、本研究で用いる姿勢推定法は相対座標系の姿勢情報を直接推定するため、先行研究の方法よりも誤差を抑えることができる。

ニュートン・オイラー法を用いた逆運動力学解析を行うためには、姿勢情報、身体パラメータ (質量 m_i , 慣性モーメント I_i , 重心位置 \hat{s}_i), 各身体部位の角速度 ${}^i\omega$, 角加速度 ${}^i\dot{\omega}$, 関節の加速度 iA , 雪面反力が必要である。姿勢情報は、前節の姿勢推定法を用いることにより得ることができ、身体パラメータは、各関節間の距離から回帰式⁽¹³⁾を用いて推定する。

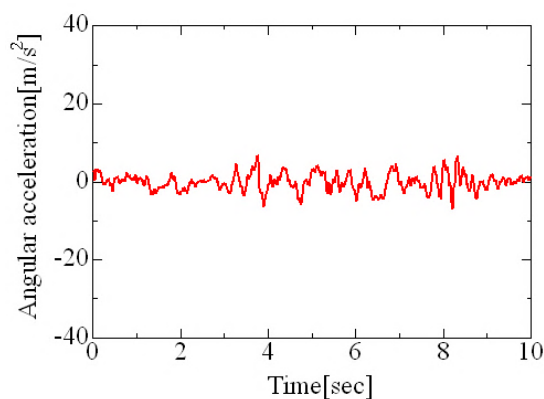
角速度にはジャイロセンサの出力を用い、角加速度には、角速度の微分値を用いる。しかし、微分演算に完全微分を用いた場合、センサノイズが増大するため、本研究では式(5.2)に示す不完全微分 D を用いる。

$$D = \frac{s}{1 + ns} \quad (5.2)$$

ここで、 s はラプラス演算子、 n は微分係数である。微分係数 n は、運動計測システムのサンプリング周波数（100Hz）以上の微分特性によるノイズの増大を抑制するために、サンプリング周波数の逆数である 0.01 とした。完全微分、不完全微分を用いた角速度の微分演算の結果を図 5.5 に示す。不完全微分を用いることにより、フィルタリング等を行わずにノイズの増大を抑えることが可能であることから、効率的な微分演算が可能である。



(a) Exact differential



(b) Inexact differential

Fig.5.5 Angular acceleration

関節の角速度は、加速度センサの出力から式(5.3)を用いて算出する.

$${}^i A {}^i A_p = \dot{\omega}^j \omega^j \times \dot{r} + \dot{\omega} \times r \quad (5.3)$$

ここで、 ${}^i A$ は関節の加速度、 ${}^i A_p$ は加速度センサ出力、 ${}^i \omega$ は角速度、 ${}^i r$ は加速度センサから関節までの位置ベクトルであり、 $[\times]$ は外積を表す.

以上より得られた情報にニュートン・オイラー法を適用する. 式(5.4)~(5.8)より重心に作用する加速度 ${}^i \ddot{s}$, 各リンクにかかる外力 ${}^i \hat{f}$, モーメント ${}^i \hat{n}$, 及び関節にかかる力 ${}^i f$, モーメント ${}^i n$ を算出し, 式(5.9)より関節トルク τ を推定する. ここで、 e は関節トルクを抽出するための行列である. 本解析法のブロック線図を図 5.6 に示す.

$${}^i \ddot{s} = {}^i A + \dot{\omega} \times {}^i \hat{s} + \omega \times (\omega \times {}^i \hat{s}) \quad (5.4)$$

$${}^i \hat{f} = m_i {}^i \ddot{s} \quad (5.5)$$

$${}^i \hat{n} = {}^i I \dot{\omega} \times \omega + ({}^i I \omega) \quad (5.6)$$

$${}^i f = {}^i R_{i+1} {}^{i+1} f + {}^i \hat{f} \quad (5.7)$$

$${}^i n = {}^i R_{i+1} {}^{i+1} n + {}^i \hat{n} + {}^i \hat{s} \times {}^i \hat{f} + {}^i \hat{p}_{i+1} \times ({}^i R_{i+1} {}^{i+1} f) \quad (5.8)$$

$$\tau = e^T {}^i n \quad (5.9)$$

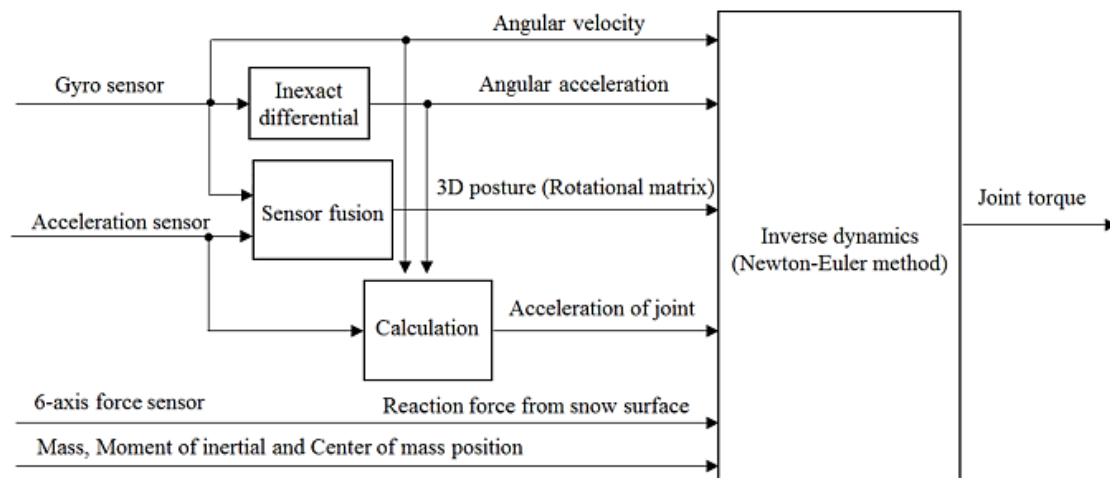


Fig.5.6 Block diagram for calculation of joint torque

5.4 計測実験

5.4.1 実験方法

運動計測システムをスキーヤーの各身体部位（上部部，腰部，左右大腿部，左右下腿部）と左右スキーブーツの計 8 ヶ所に，雪面反力計測システムを左右スキーブーツとスキー板の間に，滑走軌跡計測システムをスキーヤーヘルメット頭部にそれぞれ取り付け，カービングターンとスキッピングターンの計測実験を行った．被験者は，年齢 23 歳，身長 180cm，体重 70kg，スキー歴 17 年の男性であり，全日本スキー連盟準指導員資格を有している．また，被験者には事前に実験方法や安全性についての十分な説明を行い，実験に参加する同意を得た．スキーヤーは，平均斜度 10 度のコース上で，助走を行った後に，左右ターンを繰り返し行った．本実験における計測時間は 30 秒である．本研究では，左ターン，右ターンを合わせて 1 ターンと定義しており，ターンの概要を図 5.7 に示す．ターン中における関節トルクの変化を詳細に示すため，計測した滑走軌跡情報を用いて 1 ターン分（左ターン→右ターン）の運動を抽出し，解析を行う．

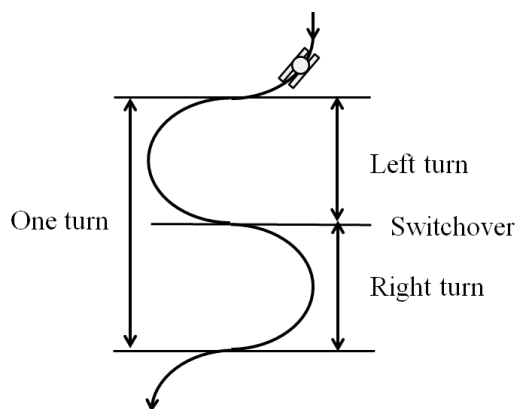


Fig.5.7 Description of one turn

5.4.2 実験結果

計測実験より得られた情報を用いて，実滑走においてカービングターン，スキッピングターンを行うスキーヤーの関節トルク（腰椎関節，左右股関節，左右膝関節，左右足関節）を推定した．関節トルクの結果を図 5.8～図 5.14 に示す．

腰椎関節の結果（図 5.8）に着目すると，カービングターンにおいては，ターン切替期に回旋トルクが大きくなっているが，スキッピングターンにおいては，ターン中に回旋ト

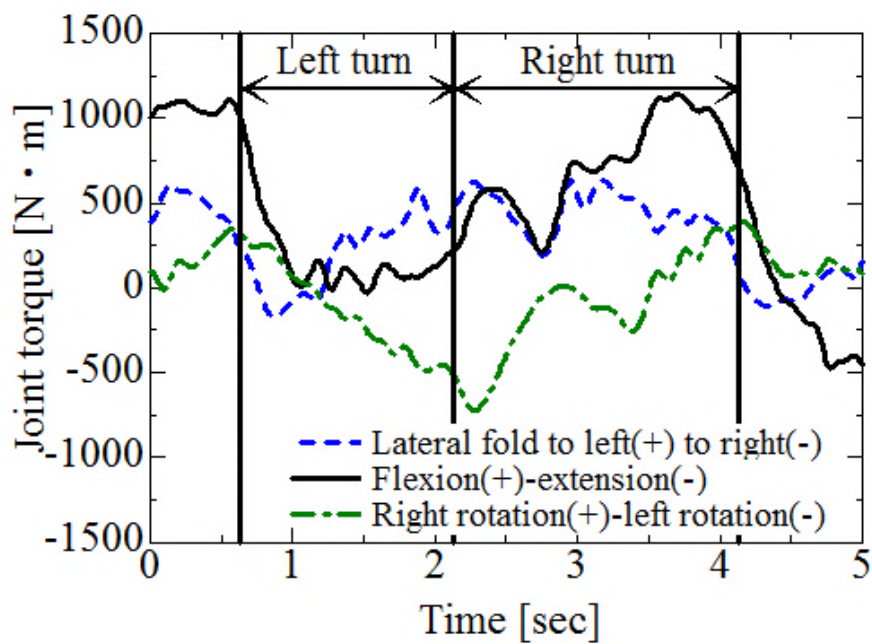
トルクが発生しており、上半身をひねるタイミングの違いが表れている。また、スキップディングターンにおいては、左ターン、右ターンともに伸展トルクが発生しているが、カービングターンにおいては、右ターン中に屈曲トルクが大きくなっており、スキーヤーが、前傾姿勢を保持するために屈曲トルクを発揮していることを示している。

右股関節トルクの結果（図 5.9）に着目すると、カービングターンにおいて、左ターン中に内転トルク、右ターン中に外転トルクが発生しており、スキーヤーがエッジを立ててスキー板をたわませるための関節トルクを発生させていることを示している。一方、スキップディングターンにおいて、左ターン中に伸展トルク、外転トルクが発生しており、スキー板の横ずれを発生させるための運動が捉えられている。左股関節トルクの結果（図 5.10）に着目すると、両ターン共に外転トルクが発生しているが、スキップディングターンの結果はより大きい外転トルクを示している。また、カービングターンにおいては、腰椎関節トルクと同様に、前傾姿勢を保持するために屈曲トルクが発生している。

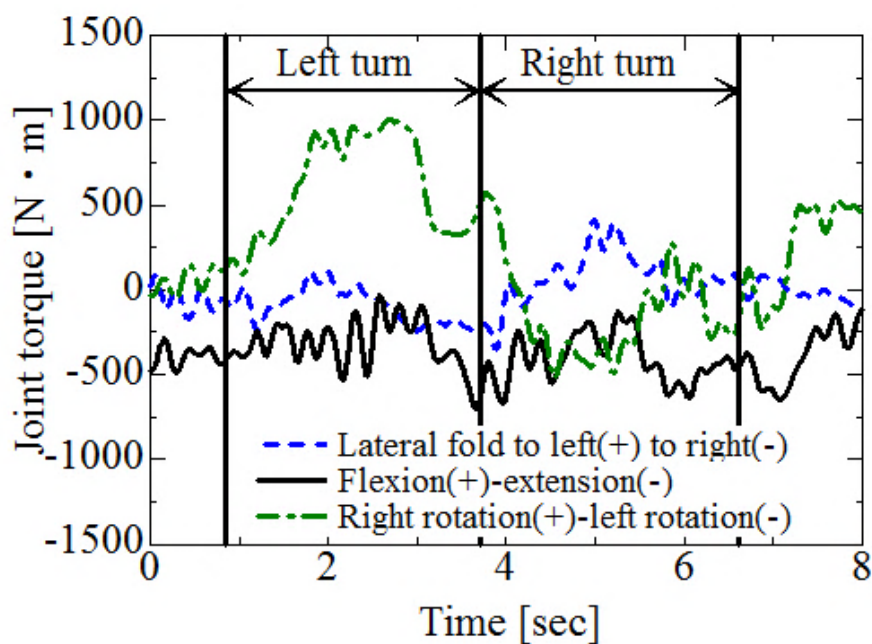
右膝関節トルクの結果（図 5.11）に着目すると、カービングターンにおいては、左ターン初期に伸展トルク、ターン中に屈曲トルクが発生している。一方、スキップディングターンにおいては、左ターン中に、雪面反力を発生させるために、伸展トルクを発揮している。左膝関節トルクの結果（図 5.12）に着目すると、カービングターンにおいて、右ターン中は雪面反力を発生させるために伸展トルクが発生しているが、スキップディングターンにおいては、右ターン中に屈曲トルクが発生しており、右膝関節トルクとは異なる結果を示している。

左右足関節トルクの結果（図 5.13, 5.14）に着目すると、内外反、回内外トルクは関節がブーツによって固定されていることからほとんど発生していないが、左右足関節共に、ターンにおいて背屈トルクが発生している。

以上より、関節トルクを用いた運動解析を行うことにより、左右ターンや異なる種類のターンによる力の使い方の違いを示すことができる。本研究において計測したスキーヤーの場合、左右ターンで力の使い方が異なっており、カービングターンの左ターンにおいては外足における股関節の内転トルクが、右ターンにおいては外足における膝関節の伸展トルクがそれぞれターンを行うために発生している。また、カービングターンにおいてのみ、前傾姿勢を保持するために腰椎関節、股関節、膝関節の屈曲トルクが発生しており、スキップディングターンにおいては、スキー板の横ずれを発生させるために、左ターンにおいて外足の股関節、膝関節における伸展トルク、左右両ターンにおいて外足の股関節における外転トルクが発生している。

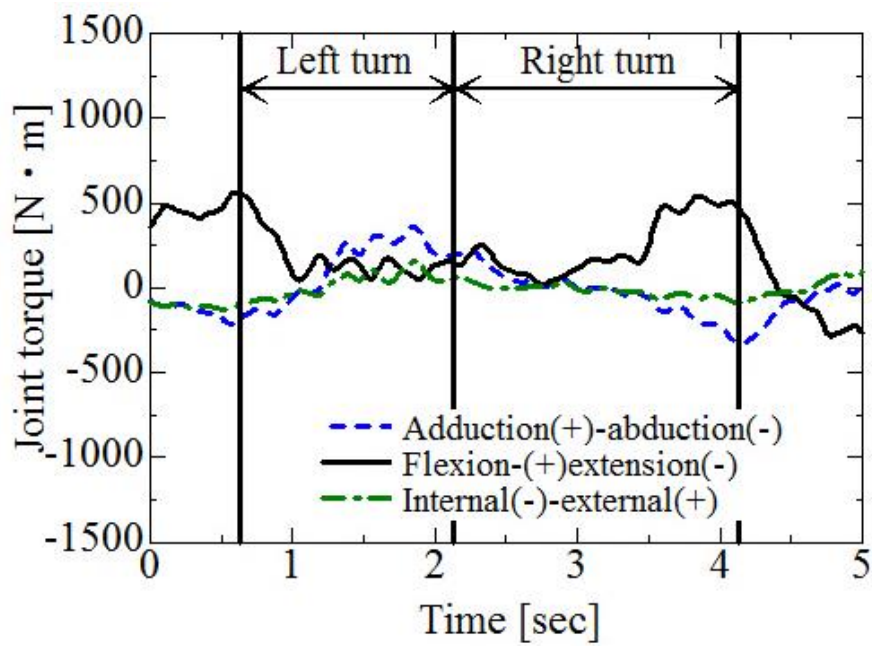


(a) Carving turn

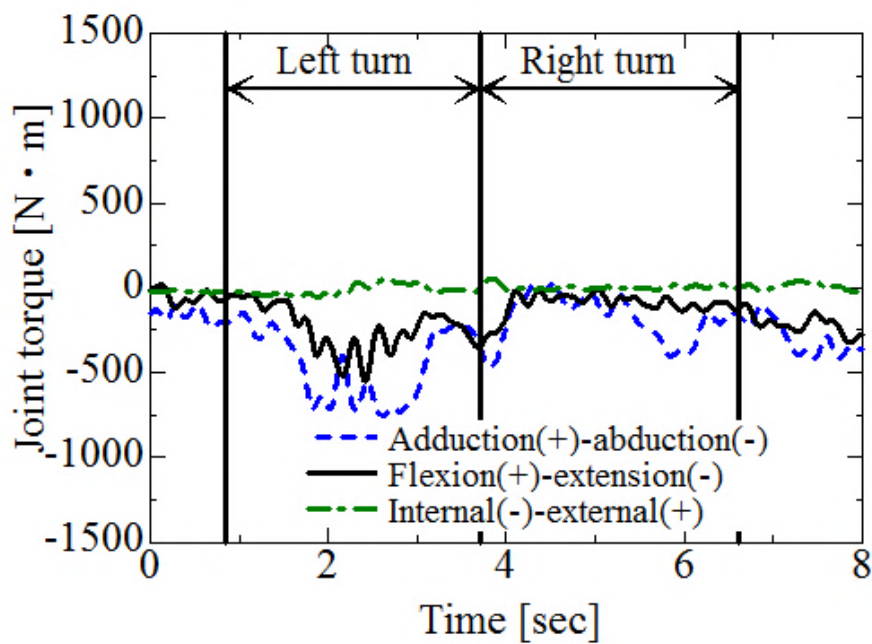


(b) Skidding turn

Fig.5.8 Lumber joint torque

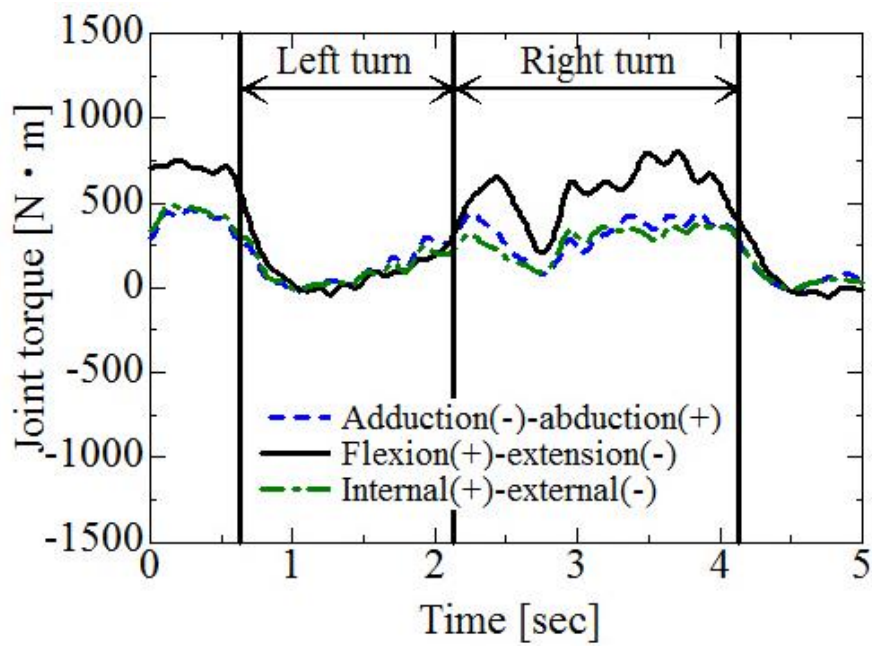


(a) Carving turn

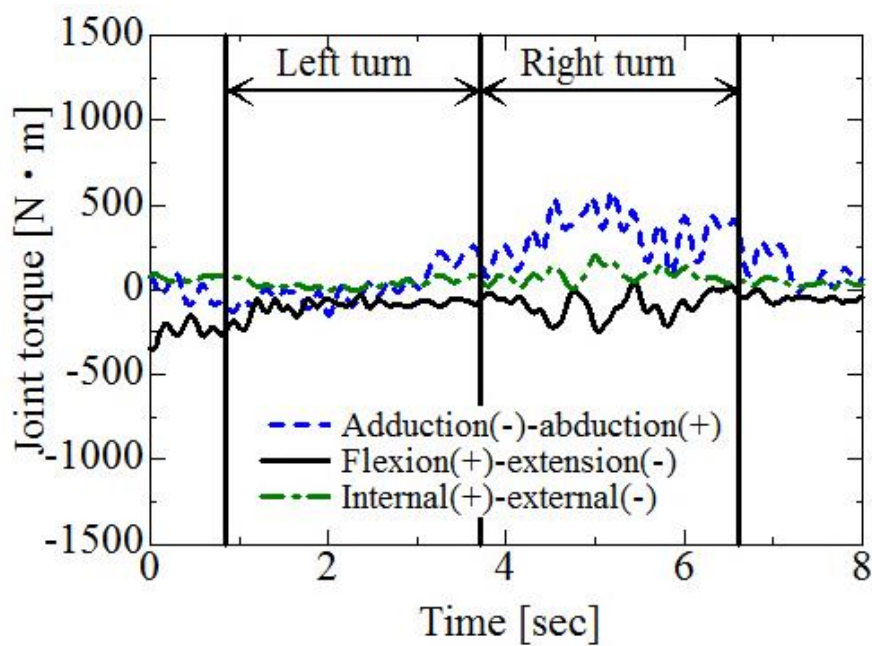


(b) Skidding turn

Fig.5.9 Right hip joint torque

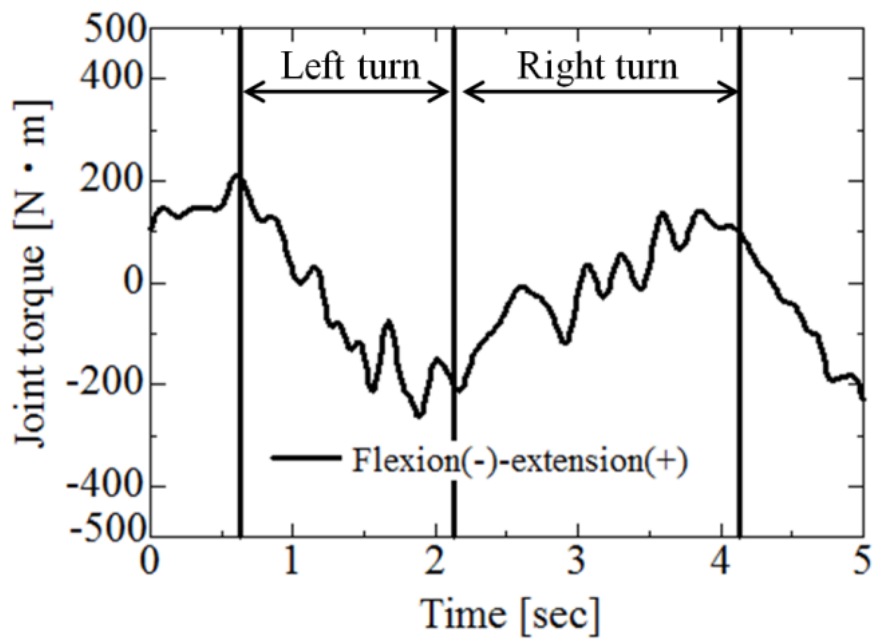


(a) Carving turn

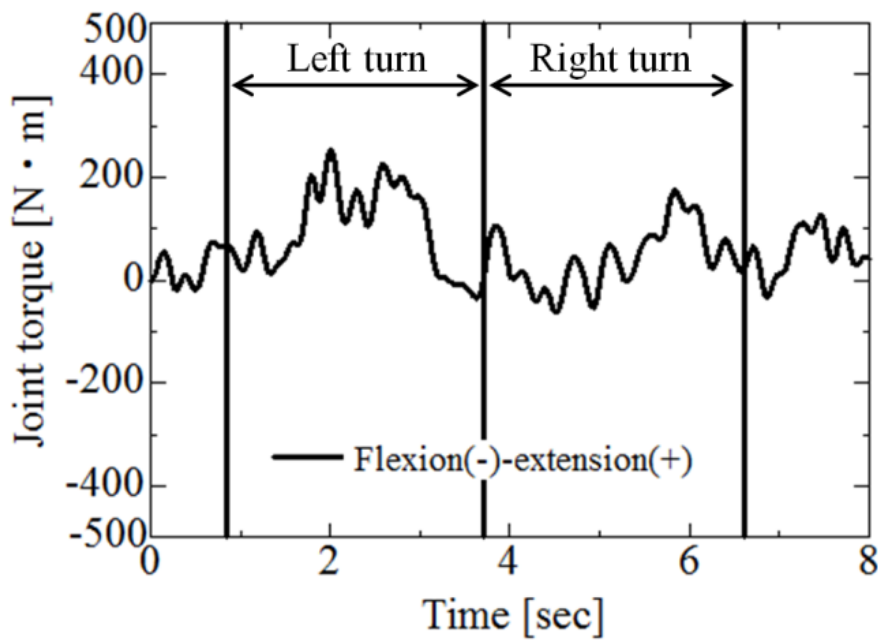


(b) Skidding turn

Fig.5.10 Left hip joint torque

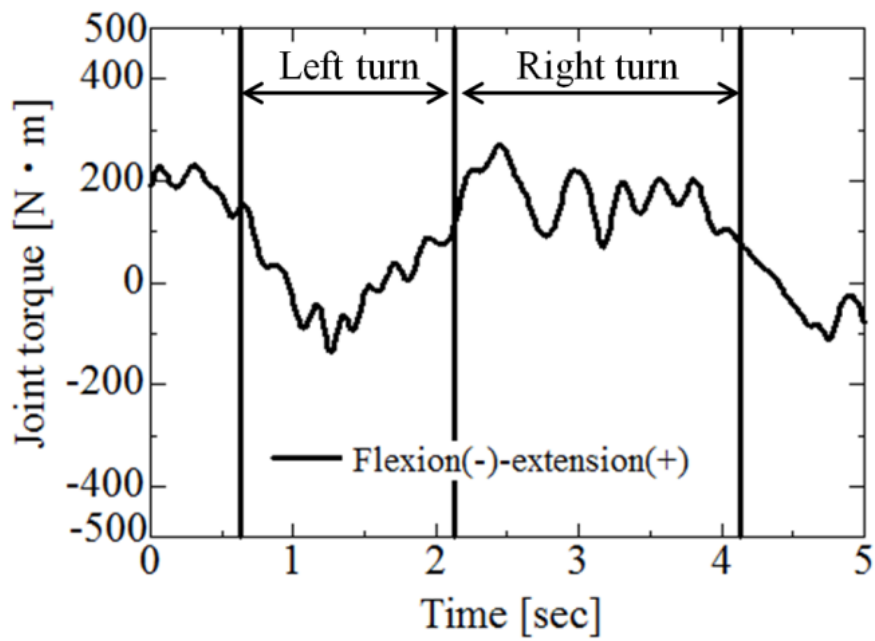


(a) Carving turn

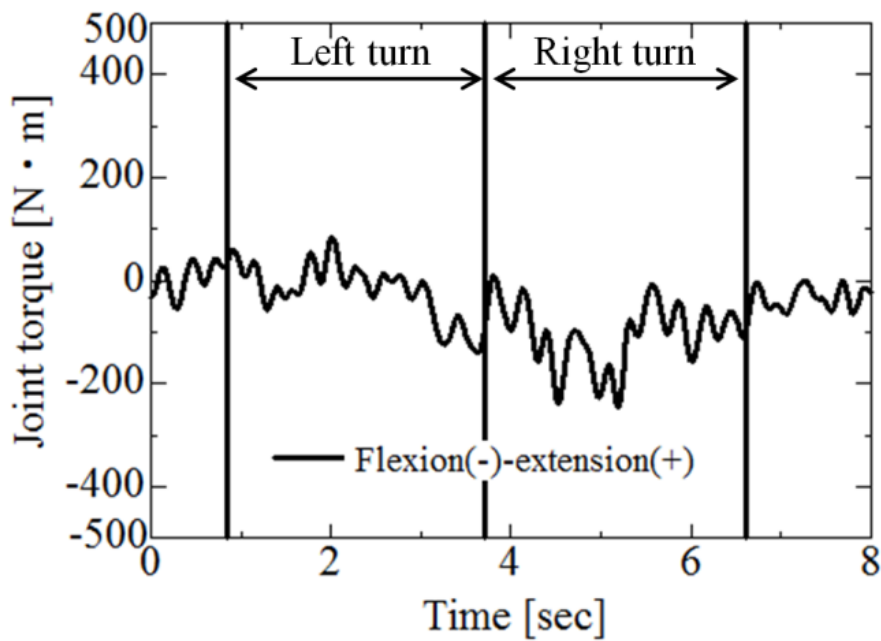


(b) Skidding turn

Fig.5.11 Right knee joint torque

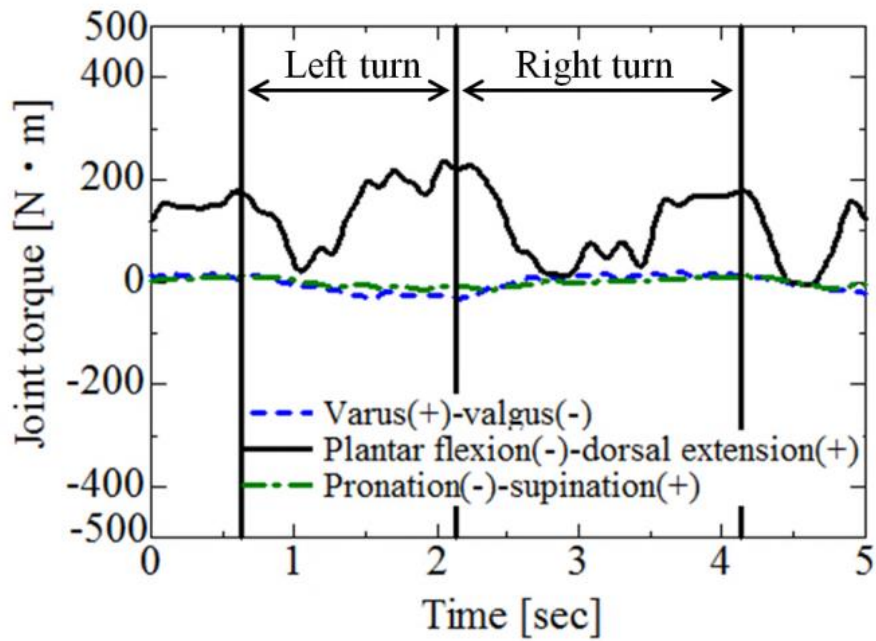


(a) Carving turn

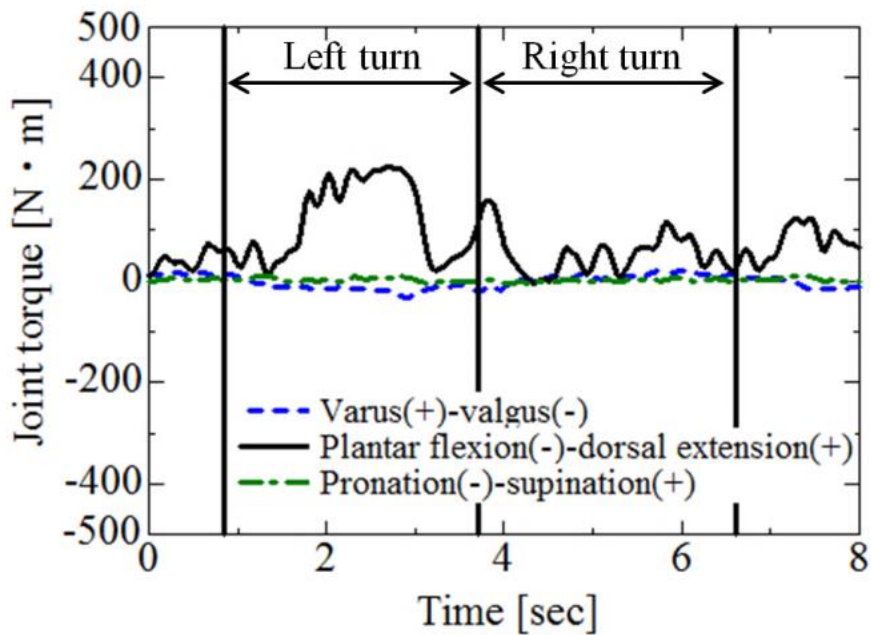


(b) Skidding turn

Fig.5.12 Left knee joint torque

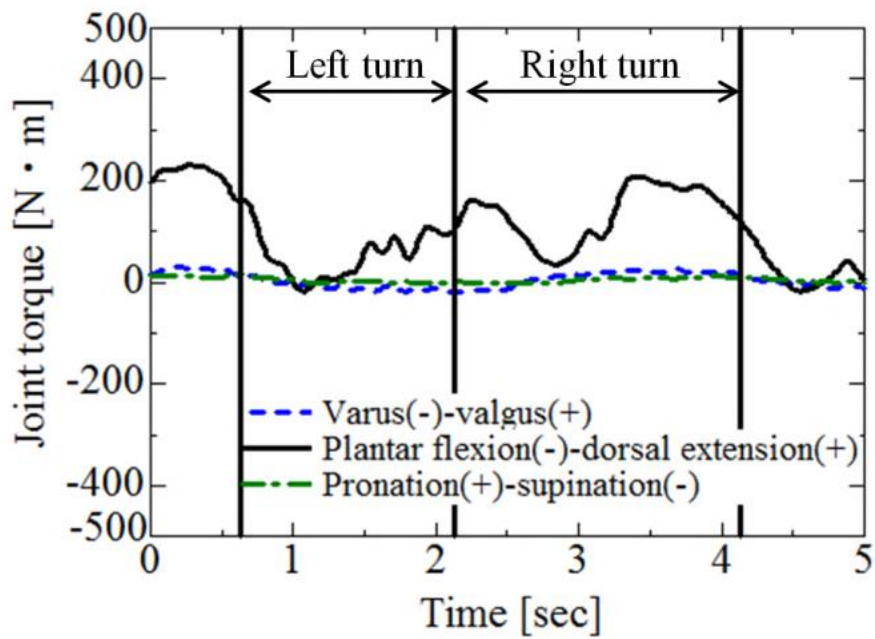


(a) Carving turn

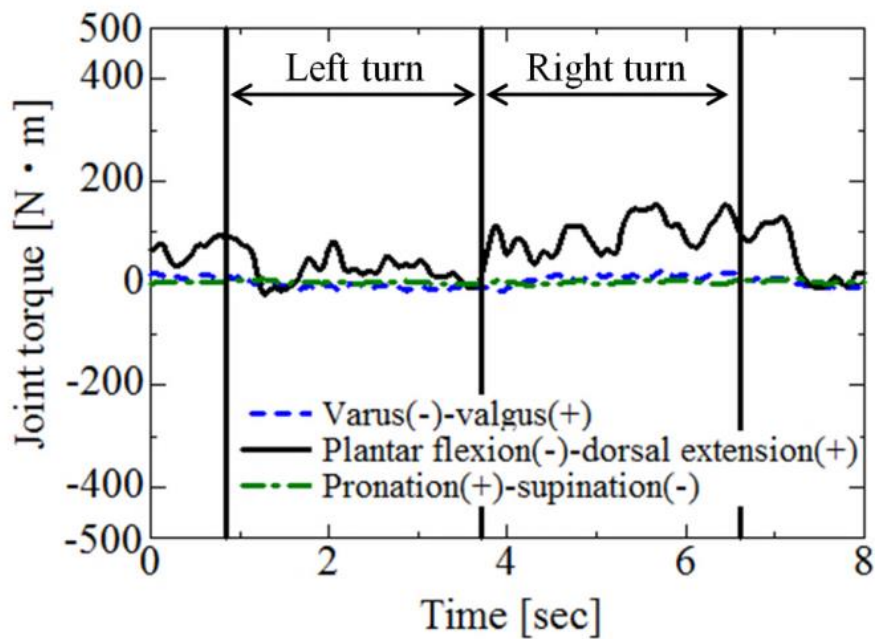


(b) Skidding turn

Fig.5.13 Right ankle joint torque



(a) Carving turn



(b) Skidding turn

Fig.5.14 Left ankle joint torque

5.5 結言

本研究では、慣性センサを用い、動的加速度の影響に対応した 3 次元姿勢推定法と雪面反力計測を併用することによる運動力学解析法を提案し、実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動解析を行った。カービングターンとスキッピングターンの両ターンについて解析を行った結果、左右ターン、異なる種類のターンによるスキーヤーが発揮するトルクの違いを示した。

本研究において提案した解析法を使用することにより、スキーヤーがターンを行うために使用する力情報の変化を詳細に捉えることができるため、効率的なターン法の開発やスキル評価への応用が期待できる。

5.6 参考文献

- (1) Brodie, M., Walmsley, A., Page, W., Fusion motion capture: a prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing, *Sports Technology*, Vol.1, No.1, pp.17-28 (2008).
- (2) Scott, N., Yoneyama, T., Kagawa, H., Osada, K., Measurement of ski snow-pressure profiles, *Sports Engineering*, Vol.10, p.145-156 (2007).
- (3) 池上康男, 桜井信二, 矢部京之助, DLT 法, *J.J. Sport*, 第 11 巻第 3 号, 191 頁～195 頁 (1991) .
- (4) King, K., Toon, S.W., Perkins, N.C., Najafi, K., Wireless MEMS inertial sensor system for golf swing dynamics, *Sensors and Actuators A*, Vol.141, pp.619-630 (2008).
- (5) King, K., Hough, J., McGinnis, R., Perkins, N.S., A new technology for resolving the dynamics of a swinging bat, *Sports Engineering*, Vol.15, pp.41-52 (2012).
- (6) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 永作清, 拡張カルマンフィルタ用いたスキー・ターンの運動計測と力学解析に関する研究, *日本機械学会論文集 C 編*, 第 77 巻第 774 号, 1346 頁～1356 頁 (2011).
- (7) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 慣性センサを用いた身体運動計測における 3 次元姿勢推定法に関する研究, *日本機械学会論文集 C 編*, 第 79 巻第 803 号, 2351 頁～2361 頁 (2013).
- (8) KONDO, A. ; DOKI, H. ; HIROSE, K. An attempt of a new motion measurement method for alpine ski turns using inertial sensors. *The Engineering of Sport* 9, pp.421-426 (2012).
- (9) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 実滑走におけるスキーヤーの 3 次元姿勢計測とターンの運動解析に関する研究, *スキー研究*. 第 10 巻第 1 号, 19 頁～26 頁 (2013).
- (10) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, スキーヤーの関節角度・滑走速度計測によるスキー・ターンの運動解析に関する研究, *スポーツ産業学研究*, 第 22 巻第 1 号, 1 頁～8 頁 (2012).
- (11) 廣瀬圭, 土岐仁, スノーボード・ターンの運動計測と解析に関する研究, *スキー研究*, 第 7 巻第 1 号, 27 頁～34 頁 (2010).

- (12) 吉川恒夫, ロボット制御基礎論, コロナ社, 86 頁～97 頁 (1988).
- (13) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志, 日本人アスリーの身体部分慣性特性の推定, バイオメカニズム, 第 11 卷, 23 頁～33 頁 (1992).

第 6 章

実滑走計測によるスキーヤーの下肢筋張力推定 と運動解析

The purpose of this study is the estimation of lower limb muscle tension and the motion analysis of skier gliding on the actual snow field. The lower limb muscle tension is estimated by the measurement information of motion and reaction force from snow surface.

The motion measurement system that consists of the gyro sensor, the acceleration sensor and the magnetic field sensor measures the 3-axis angular velocity, the 3-axis acceleration and the 3-axis magnetic field. The measurement system of reaction force from snow surface that consists of the 6-axis force sensor measures 3-axis force and 3-axis moment vectors from snow surface. The joint angles and joint torques are calculated using the sensor fusion, the inverse kinematics and the inverse dynamics. The lower limb muscle tension is estimated by applying the joint angle, the joint torque and the body segment parameter to the 3D muscle-skeleton model.

The measurement experiment was conducted by the skier gliding on the actual snow field. The motion measurement systems were attached to body segments of skier (lumber, upper thighs and lower thighs) and ski boots. The measurement systems of reaction force were installed to between boots and skis. The results of the motion analysis by the lower limb muscle tension indicated the major muscle activities of the skier gliding on the actual snow field. Therefore, the motion analysis method can be used to development of training and injury prevention methods.

6.1 諸言

スキーは幅広い年齢に親しまれおり、産業規模も大きいことから、スキー振興調査に関する研究⁽¹⁾、スキーブーツの剛性・曲げ性状に関する研究⁽²⁾、スキーヤーの臨床観察に関する研究⁽³⁾等、様々な分野における研究が行われている。スキーは、重力を利用して滑走するスノースポーツであり、専用の道具を用いるため、他のスポーツとは運動のメカニズムが異なる。スキー・ターンのメカニズムを解明するためには、スキーヤーの運動を定量的に示すことが必要である。これまで、スキー・ターンのメカニズムを解明するための研究として、スキーロボット、ターンモデルの開発⁽⁴⁾⁽⁵⁾ やスキー板に関する研究⁽⁶⁾等が行われている。静的な環境や限定的な条件における研究では、実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動を捉えることはできないため、スキー・ターンのメカニズムを解明するためには、実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動情報が必要である。しかし、スキーは広大な雪面を滑走するスポーツであるため計測が難しく、実滑走におけるスキーヤーの運動情報を計測する研究は非常に少ない。そのため、実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動計測を行い、関節負荷や筋の働きを明らかにすることができれば、スキー・ターンのメカニズム解明に役立てることができ、効果的なトレーニング法の開発、怪我の予防対策への応用が期待できる。

これまで、実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動計測、解析に関する研究として、3次元磁気式位置センサを用いた方法と6軸力センサによる雪面反力計測を併用した計測システムを用いた計測実験を行い、得られた関節モーメントに2次元筋骨格モデルを適用した筋張力推定⁽⁷⁾が行われている。しかし、この研究で用いられている関節モーメントは、静力学的解析によって算出したものである。さらに、筋張力推定に2次元筋骨格モデルを使用しているため、推定する筋を限定している。よって、より詳細な運動解析を行うためには、動力学的解析を用いて関節トルクを計算する必要がある。下肢すべての筋を対象とした筋張力を推定する必要がある。

本論文では、第2章にて慣性センサを用いた3次元姿勢推定法の構築、第3章～第5章にて構築した推定法を用いたスキー・ターンの運動学的解析、運動力学解析を行ってきたが、スキーヤーの筋張力に着目した解析は行っていない。そこで、本研究では、慣性センサ・地磁気センサを搭載した運動計測システムと6軸力センサを搭載した雪面反力計測システムを用いた、実際の雪面を滑走するスキーヤーの計測実験を行い、運動学的解析法、動力学的解析法を用いて算出した関節角度、関節トルクを3次元筋骨格モデルへ適用することにより、スキーヤーの下肢筋張力推定を行う。そして、得られた筋張力を用いた解析を行い、実際の雪面を滑走するスキーヤーの筋の働きを明らかにする。

6.2 計測システム

6.2.1 運動計測システム

スキーヤーの運動計測を行うために、ジャイロセンサ、加速度センサ、地磁気センサを搭載した運動計測システム⁽⁸⁾を用いる。運動計測システムを図 6.1 に示す。運動計測システムには、ジャイロセンサ(ANALOG DEVICES, ADIS16100), 3 軸加速度センサ(日立金属, H30CD), 2 軸地磁気センサ(日立金属, HM55B)が搭載されている。本システムのジャイロセンサ、地磁気センサは 3 軸直交配置されており、3 軸の角速度、加速度、磁場を計測することができる。



Fig.6.1 Motion measurement system

6.2.2 雪面反力計測システム

雪面反力計測システム⁽⁹⁾を図 6.2 に示す。本システムは、6 軸力センサをブーツの底面に装着しており、ブーツ底面にかかる雪面反力および反力の作用点位置を計測する。



Fig.6.2 Measurement system for reaction force of snow surface

6.3 運動解析法

6.3.1 解析モデル

本研究では、関節角度、関節トルクを算出するために、3次元剛体リンクモデル⁽¹⁰⁾を用いる。3次元剛体リンクモデルを図6.3に示し、関節定義を表6.1に示す。本モデルは、股関節と足関節を3自由度とし、膝関節を1自由度とした計14自由度のモデルである。

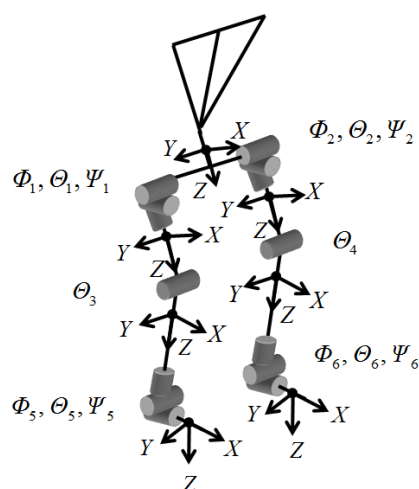


Fig.6.3 3D rigid link model

Table 6.1 Definition of joint angle

Φ_1	Right hip adduction (+) abduction (-)	Θ_4	Left knee flexion (-) extension (+)
Θ_1	Right hip extension (-) flexion (+)	Φ_5	Right lower thigh pronation (+) supination (-)
Ψ_1	Right hip internal rotation (-) external rotation (+)	Θ_5	Right foot plantar flexion (-) dorsal flexion (+)
Φ_2	Left hip extension (-) flexion (+)	Ψ_5	Right foot varus (+) valgus (-)
Θ_2	Left hip adduction (-) abduction (+)	Φ_6	Left lower thigh pronation (-) supination (+)
Ψ_2	Left hip internal rotation (-) external rotation (+)	Θ_6	Left foot plantar flexion (-) dorsal flexion (+)
Θ_3	Right knee flexion (-) extension (+)	Ψ_6	Left foot varus (-) valgus (+)

6.3.2 関節角度

運動計測システムから得られる情報を用いて股関節，膝関節，足関節の関節角度を算出する．関節角度を算出するためには，姿勢情報を算出し，逆運動学を適用する必要がある．姿勢情報は，拡張カルマンフィルタを用いたセンサ・フュージョン⁽¹¹⁾を適用することで推定する．本研究で用いるセンサ・フュージョン⁽⁸⁾のブロック線図を図 6.4 に示す．本方法は，2つの運動計測システムからの計測情報（角速度，加速度，磁場）を用いて，絶対座標系における3次元姿勢情報（ロール角 φ ・ピッチ角 θ ・ヨー角 ψ ）を推定する．

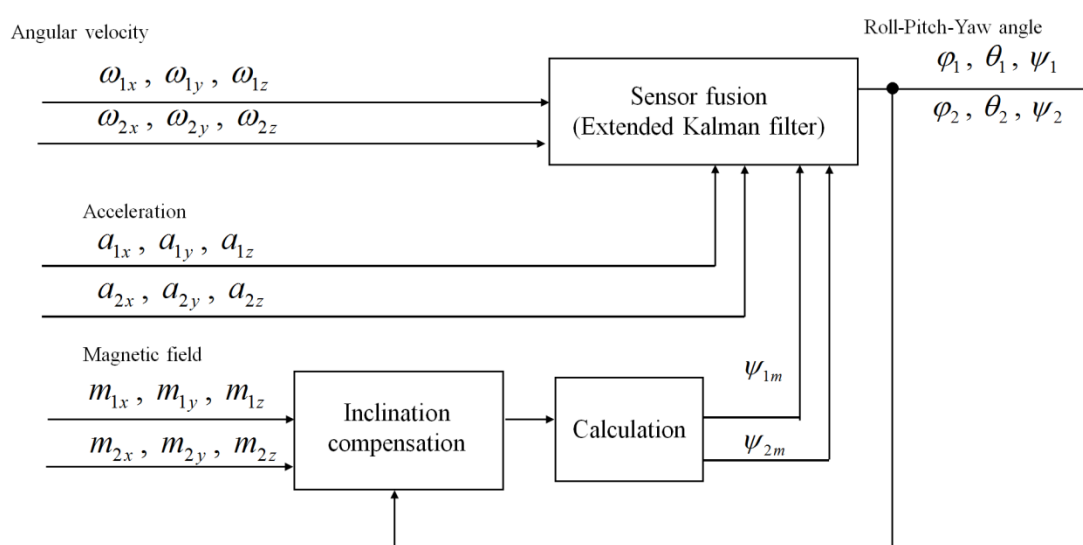


Fig 6.4 Block diagram for estimation of 3D posture

得られた姿勢情報は、式(6.1)を用いて絶対座標系の回転行列 0R_i に、式(6.2)を用いて、相対座標系の回転行列 ${}^{i-1}R_i$ に変換し、式(6.3)~(6.5)より関節角度 ${}^{i-1}\Phi_i$, ${}^{i-1}\Theta_i$, ${}^{i-1}\Psi_i$ を算出する⁹⁾。ここで、 ${}^{i-1}\Phi_i$ は内外転角度、内外反角度、 ${}^{i-1}\Theta_i$ は屈曲伸展角度、底背屈角度、 ${}^{i-1}\Psi_i$ は内外旋角度、回内外角度を表す。

$${}^0R_i = R(\psi) \cdot R(\theta) \cdot R(\varphi)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$${}^{i-1}R_i = \left({}^0R_i \right)^{-1} \cdot {}^0R_i \quad (6.2)$$

$${}^{i-1}\Psi_i = \tan^{-1} \frac{R_{21}}{R_{22}} \quad (6.3)$$

$${}^{i-1}\Theta_i = \tan^{-1} \frac{R_{13}}{R_{33}} \quad (6.4)$$

$${}^{i-1}\Phi_i = \tan^{-1} \frac{-R_{23}}{\sqrt{R_{21} \cdot R_{21} + R_{22} \cdot R_{22}}} \quad (6.5)$$

ただし、

$${}^{i-1}R_i = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

6.3.3 関節トルク

計測システムから得られる、角速度、加速度、角速度を微分して得られる角加速度、雪面反力と前節にて算出した相対座標系の回転行列を用いてニュートン・オイラー法による逆動力学解析⁽¹²⁾を行い、関節トルクを算出する。解析を行う際に必要な各身体部位の質量、慣性モーメント、重心位置は、各身体部位のリンク長から回帰式⁽¹³⁾を用いて推定する。

6.3.4 筋張力推定

6.3.2 節, 6.3.3 節にて算出した, 関節角度, 関節トルクを 3 次元筋骨格モデルに適用し, スキーヤーの下肢筋張力を推定する. 筋張力推定には, 3D マッスルシミュレータ ARMO⁽¹⁴⁾ を用い, 両下肢 88 個の筋張力を推定する. 筋張力推定のブロック線図を図 6.5 に示す. 本研究では, 得られた結果から中殿筋, 半膜様筋, 半腱様筋, 大腿二頭筋長頭, 大腿二頭筋短頭, 大腿直筋, 外側広筋, 内側広筋の筋張力を用いて解析を行う. 3 次元筋骨格モデルと解析に用いる筋を図 6.6 に示す. ターン中の運動を詳細に捉えるために, 地磁気センサを用いた滑走状態推定法⁽¹⁵⁾ を用いて, ターン切替期を推定し, 1 ターン分の結果を抽出している.

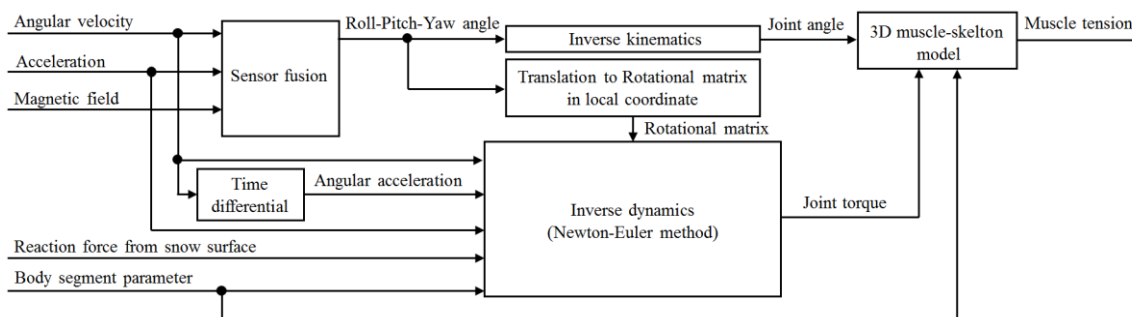


Fig.6.5 Block diagram for estimation of muscle tension

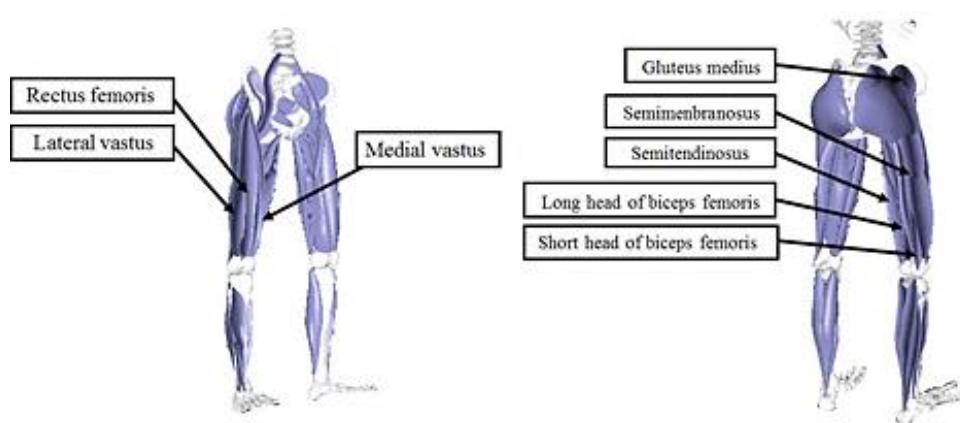


Fig.6.6 3D muscle skeleton model

6.4 計測実験

6.4.1 実験方法

本方法の有用性を検証するために、運動計測システムをスキーヤーの各身体部位（腰部，左右大腿部，左右下腿部，左右足部）計 7 ヶ所に，雪面反力計測システムをスキー板とブーツの間に取り付け，計測実験を行った．各システムの取り付け位置を図 6.7 に示す．被験者は，身長 162cm，体重 60kg の男性であり，全日本スキー連盟指導員資格を有している．また，被験者には事前に実験方法や安全性についての十分な説明を行い，実験に参加する同意を得た．スキーヤーは，約 20m の助走を経て，カービングターンを行いながら平均斜度 10 度のコースを滑走した．滑走コースの概要を図 6.8 に示す．本実験における計測時間は 30 秒，サンプリング周波数は 100Hz とした．

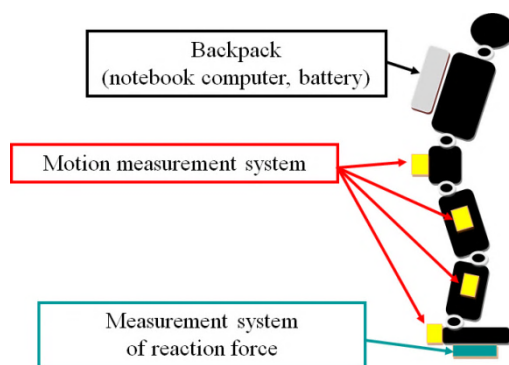


Fig.6.7 Setting positions of measurement system

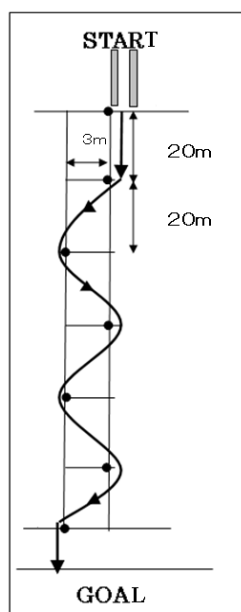


Fig.6.8 Experimental course

6.4.2 実験結果

各身体部位に取り付けた運動計測システムの情報より股関節，膝関節，足関節角度を算出し，運動計測システムと雪面反力計測システムの情報を併用した逆動力学解析より，股関節，膝関節，足関節トルクを推定した．左右股関節角度の結果を図 6.9，6.10 に示し，左右股関節トルクの結果を図 6.11，6.12 に示す．これらの情報を 3 次元筋骨格モデルに適用し，実際の雪面を滑走するスキーヤーの下肢筋張力を推定した．ただし，右ターン→左ターンを 1 ターンとし，スピードが乗り，安定した状態におけるスキーヤーの運動解析を行うために，2 ターン目の結果を抽出している．

左右股関節角度の結果（図 6.9，6.10）は，スキーヤーが左右ターン共に内足の屈曲運動，内転運動，外旋運動，外足の外転運動，内旋運動を行っていることを示しており，ほぼ左右対称の滑走フォームによってターンが行われていることを示している．しかし，左右股関節トルクの結果（図 6.11，6.12）に着目すると，右ターン中に左股関節の屈曲トルク，内転トルクが発生しており，左ターンにおける右股関節トルクは，右ターンにおける左股関節トルクよりも小さくなっていることから，関節トルクの結果においては，左右ターンで力の使い方が異なっている．この結果は，本研究において計測したスキーヤーは右利きであるため，利き足が外足となる左ターンにおいて，右ターンよりも少ないエネルギーにてターンを行っていることを示しており，本研究において計測したスキーヤーの運動の特徴や癖が表れている．

中殿筋，半膜様筋の筋張力推定結果を図 6.13 に，半腱様筋，大腿直筋の筋張力推定結果を図 6.14 に，大腿二頭筋長頭，大腿二頭筋短頭の筋張力推定結果を図 6.15 に，内側広筋，外側広筋の筋張力推定結果を図 6.15 にそれぞれ示す．筋張力は，最適化計算を用いて推定されているため，拮抗している筋の釣り合い条件の違いによって，解が無数に存在する．そこで，推定した全筋張力の最大値を 100% として正規化し，筋張力の変化に着目した解析，考察を行う．

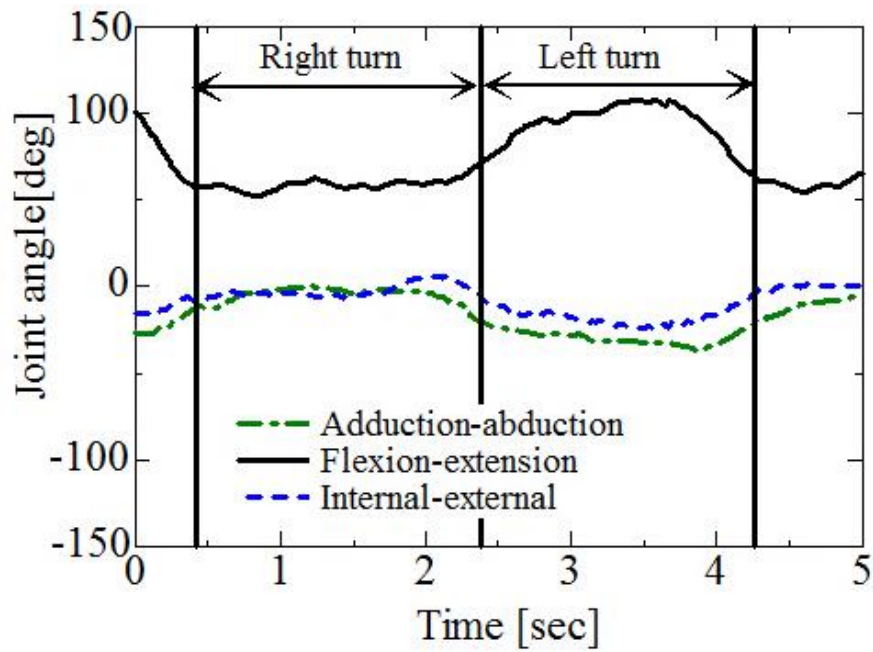


Fig.6.9 Left hip joint angle

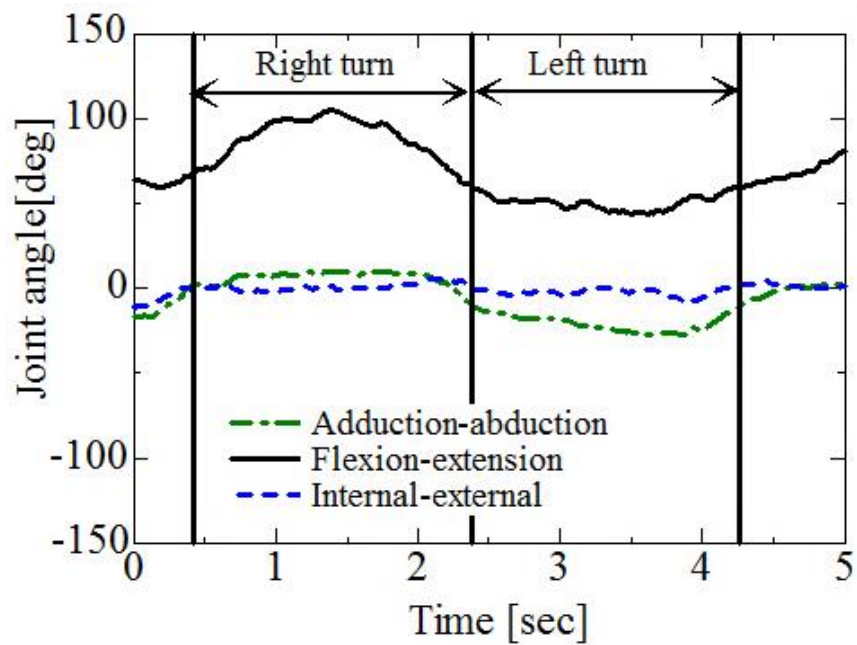


Fig.6.10 Right hip joint angle

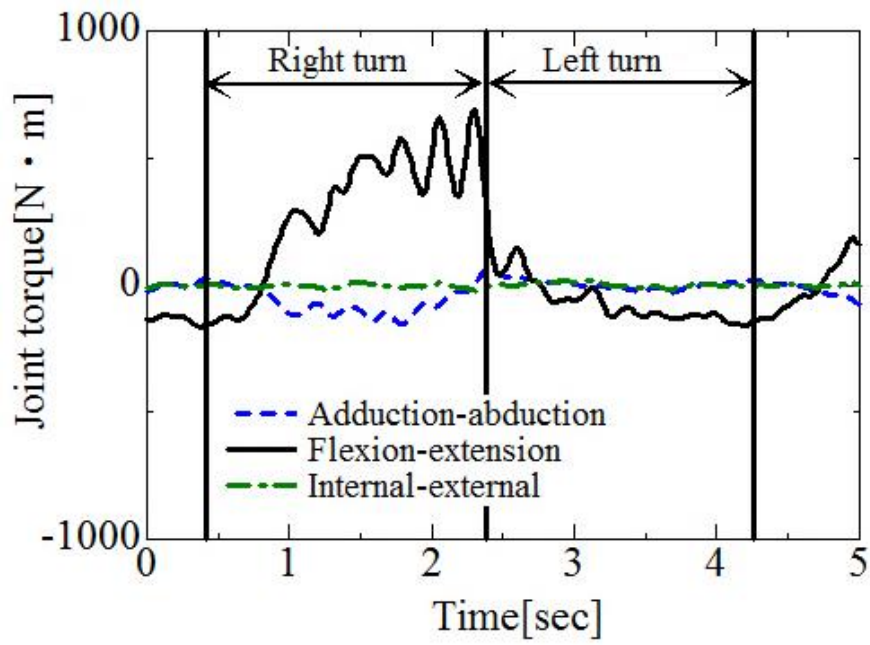


Fig.6.11 Left hip joint torque

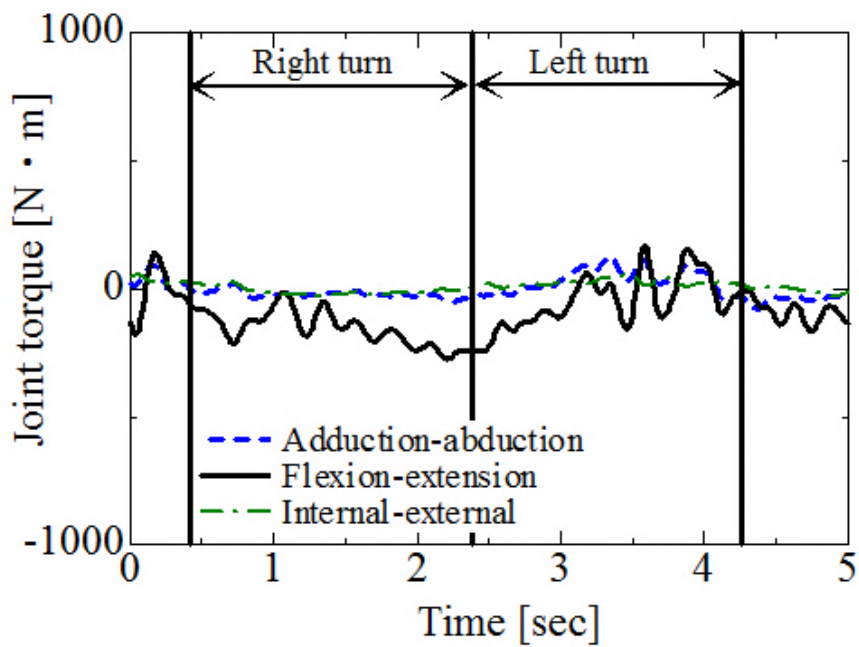


Fig.6.12 Right hip joint torque

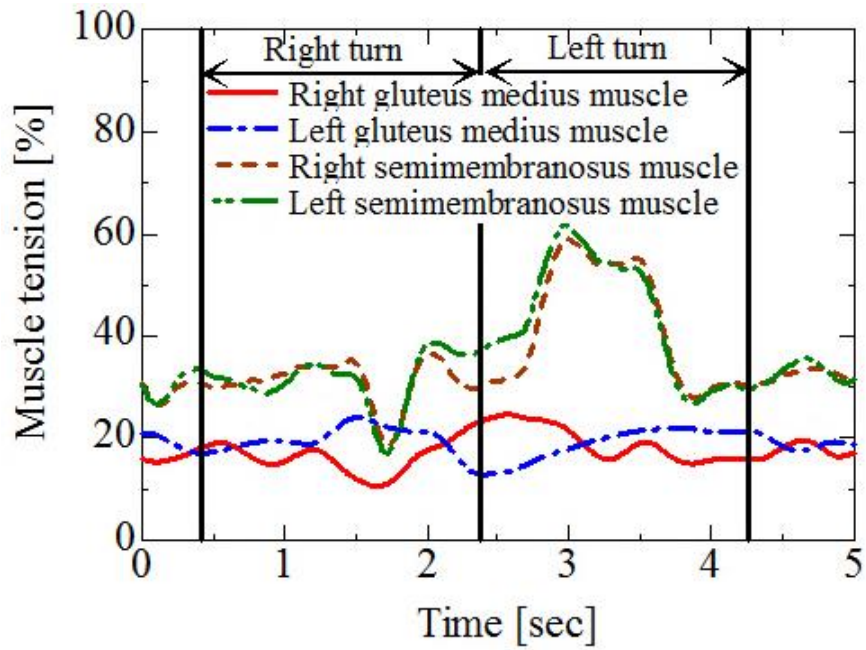


Fig.6.13 Muscle tension (Gluteus medius muscle, demimembranosus muscle)

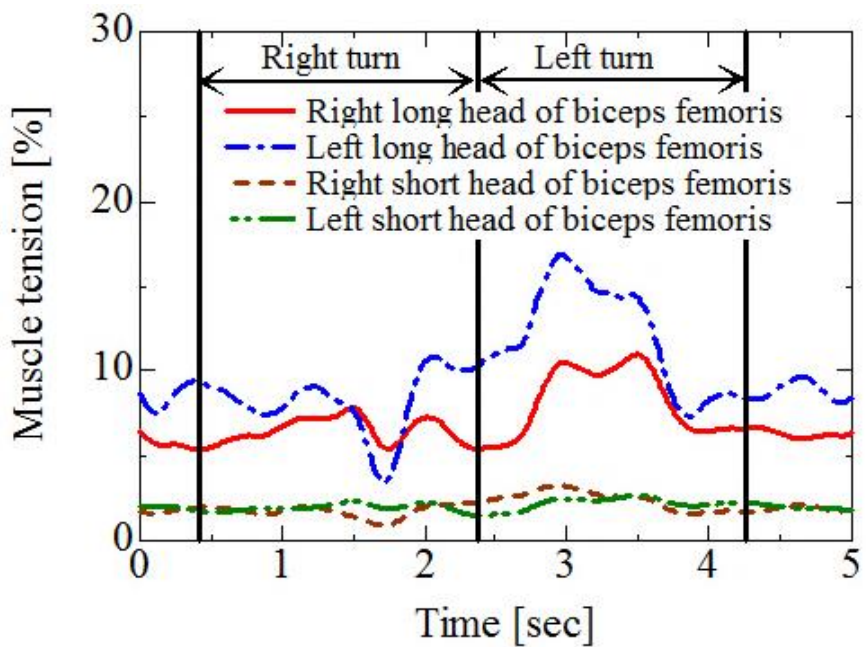


Fig.6.14 Muscle tension (long head of biceps femoris, short head of biceps femoris)

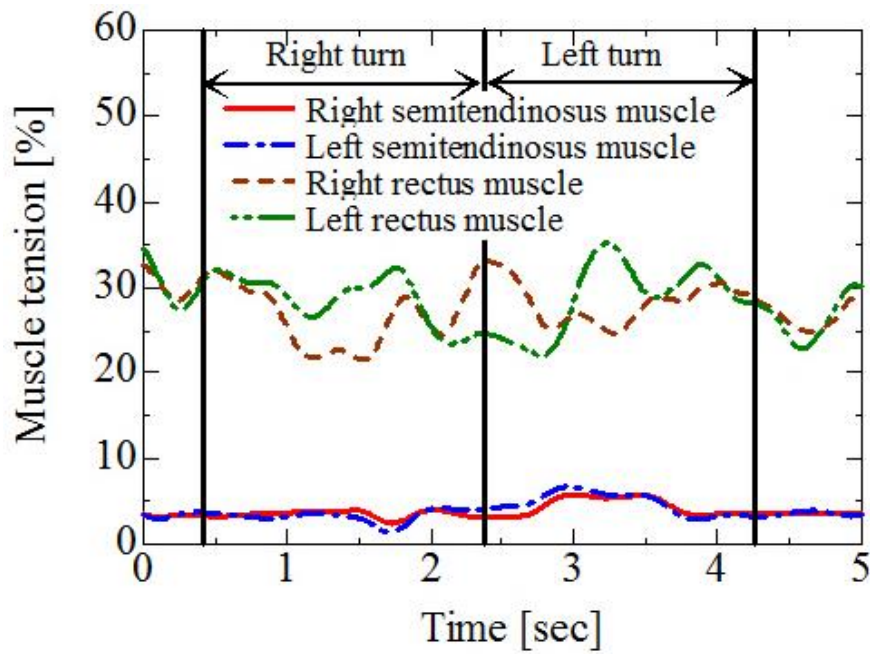


Fig.6.15 Muscle tension (Semitendinosus muscle, rectus muscle)

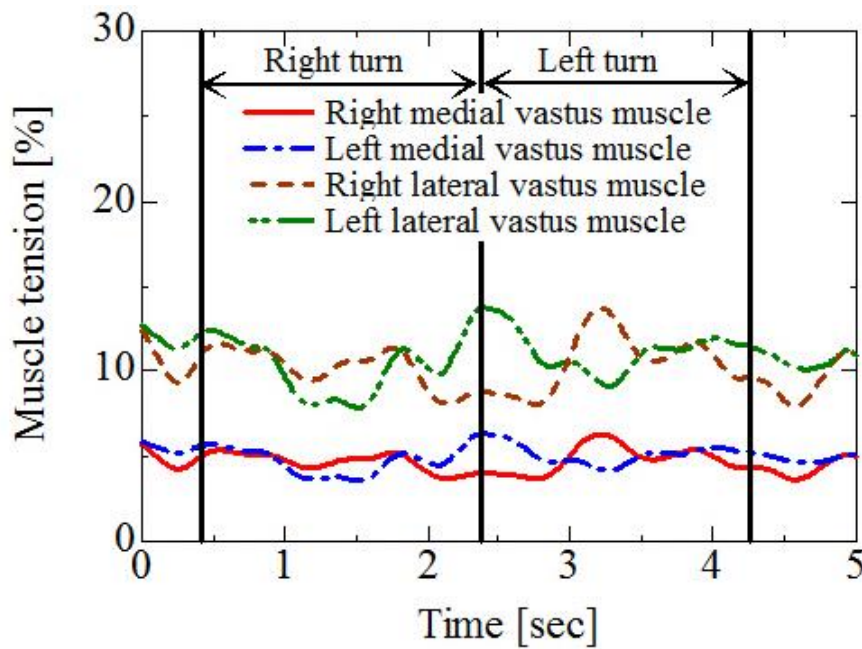


Fig.6.16 Muscle tension (Medial vastus muscle, lateral vastus muscle)

6.4.3 解析・考察

中殿筋，大腿二頭筋短頭の筋張力は，右ターン中期において左足側の筋張力が増加し，左ターン初期において右足側の筋張力が増加した．半膜様筋，半腱様筋，大腿二頭筋長頭は，左右共に右ターン中において減少し，左ターン中に増加した．内側広筋，外側広筋は，右ターンから左ターンへのターン切替期において，左足側の筋張力が増加し，左ターン中に右足側の筋張力が増加した．一方で，大腿直筋の筋張力は，内側広筋，外側広筋とは反対に，右ターンから左ターンへのターン切替期において右足側の筋張力が増加し，左ターン中に左足側の筋張力が増加した．

中殿筋，大腿二頭筋短頭は背面の 1 関節筋，半膜様筋，半腱様筋，大腿二頭筋長頭は前面の 2 関節筋，内側広筋，外側広筋は前面の 1 関節筋，大腿直筋は前面の 2 関節筋であり，それぞれの筋群における筋張力は，同様の傾向を示した．

背面の 1 関節筋は，右ターン中に左足における筋の筋張力が発生し，左ターン中に右足における筋の筋張力が発生していることから，比較的左右対称の筋張力を発生させているのに対し，背面の 2 関節筋は，右ターン中に減少し，左ターン中に増加していることから，左右非対称の筋張力を発生させている．この結果は，本研究にて計測したスキー・ターンでは，1 関節筋と 2 関節筋の働きが異なっていることを示している．

右ターンにおいて，背面の 2 関節筋における筋張力は減少し，ターン中に外足となる左足における背面の 1 関節筋の筋張力は増加した．左ターンにおいて，両足共に 2 関節筋の筋張力は増加していた．以上より，右ターンにおいては背面の 1 関節筋が使用され，左ターンにおいては背面の 2 関節筋が使用されていることを示した．

2 関節筋は，姿勢を制御するために働いていると考えられている⁽¹⁶⁾．スキーは，姿勢を制御することによりターンを行い，滑走するスポーツであるため，ターンを行うためには，2 関節筋が重要であると考えられる．関節トルクの結果（図 6.11, 6.12）より，本研究において計測したスキーヤーの利き足である右足が外足となる左ターンにおいて，エネルギーの少ない効率的なターンを行っていることが示されており，筋張力の結果においても，左ターンにおいて 2 関節筋の筋張力が発生していた．以上より，効率的なターンを行うためには，2 関節筋の働きが重要であることを示すことができ，関節角度や関節トルクを用いた解析からでは得ることができない運動の特徴を示した．

6.5 結言

実際の雪面を滑走するスキーヤーの筋の働きを明らかにするために、慣性センサ・地磁気センサを搭載した運動計測システムと 6 軸力センサを搭載した雪面反力計測システムを取り付けたスキーヤーによる計測実験を行った。得られた計測情報を用いて、スキーヤーの下肢筋張力推定、運動解析を行うことにより、実際の雪面を滑走するスキーヤーの筋の働きとその特徴を示した。

本方法を用いることにより、実滑走のターンにおいて時々刻々と変化するスキーヤーの筋の働きを示すことが可能であり、計測したスキーヤーの運動の特徴や癖を詳細に示すことが可能である。本方法を用いた運動解析の結果は、スキー・ターンのメカニズム解明、新しいトレーニング法の開発、怪我のリスク評価等への応用が期待できる。

6.6 参考文献

- (1) 新井博, 1940 年幻の札幌冬季オリンピックに向けてのスキー振興—1928~35 年全日本スキー連盟の活動を中心に—, 日本スキー学会, スキー研究, 第 10 巻第 1 号, 35 頁~45 頁 (2013).
- (2) Petrone, N., Marcolin, G., Panizzolo, A. F., The effect of boot stiffness on field and laboratory flexural behavior of alpine ski boots, *Sports Engineering*, Vol.16, No.4, pp.265-280 (2013).
- (3) 田久保興徳, 竹下秀之, 中村文紀, 山田哲也, 西垣泰典, 澤田佳江, 橋口淳一, 藤田裕, 左大腿骨人工骨頭置換術後 8 シーズンスキー活動を行っている 1 症例, 日本スキー学会誌, 第 22 巻第 1 号, 65 頁~68 頁 (2010).
- (4) 清水史郎, 土岐仁, 野尻奈央子, 受動型横ずれターンモデルの開発—股関節の外転・内転と股関節の内旋による複合モデル—, スキー研究, 第 9 巻第 1 号, 29 頁~33 頁 (2012).
- (5) 清水史郎, 土岐仁, 山根真紀, 野尻奈央子, 受動型横ずれターンモデルの開発—股関節の回旋によるプルークボーゲン—, スキー研究, 第 10 巻第 1 号, 13 頁~18 頁 (2013).
- (6) 坂田敏行, 谷徳之, 嶋崎竜也, スキーターンに及ぼすスキー板の幅, 長さおよび曲げ剛性の影響, 日本機械学会論文集 C 編, 第 64 巻第 628 号, 81 頁~87 頁 (1998).
- (7) 巖見武裕, 桜井裕樹, 土岐仁, スキー滑走における生体負荷の解析手法, 日本機械学会論文集 C 編, 第 68 巻第 666 号, 562 頁~568 頁 (2002).
- (8) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 永作清 (2011) 拡張カルマンフィルタを用いたスキー・ターンの運動計測と力学解析に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 第 77 巻第 774 号, 470 頁~480 頁 (2011).
- (9) 土岐仁, 山田知明, 穂苺真樹, 廣瀬圭, スノーボード・ターンの関節負荷推定の一試み, スポーツ産業学研究, 第 17 巻第 1 号, 33 頁~44 頁 (2007).
- (10) 廣瀬圭, 土岐仁, スノーボード・ターンの運動計測と解析に関する研究, スキー研究, 第 7 巻第 1 号, 27 頁~34 頁 (2010).
- (11) 片山徹, 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, 86 頁~97 頁 (2000).

- (12) 吉川恒夫, ロボット制御基礎論, コロナ社 (1988).
- (13) 阿江 通良, 湯 海鵬, 横井 孝志, 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定, バイオメカニズム, 第 11 巻, 23 頁~33 頁 (1992) .
- (14) 長谷和徳, SIMM, ARMO, AnyBodyによる動作解析, バイオメカニズム学会誌, 第33巻 第3号, 205頁~211頁 (2009).
- (15) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 慣性センサを用いたスノーボード滑走におけるエッジング量計測法, スキー研究, 第 6 巻第 1 号, 27 頁~32 頁 (2009).
- (16) 熊本水頼, ヒューマノイド工学, 東京電機大学出版局, 1 頁~7 頁 (2006).

第 7 章

結論

本論文では、動的加速度、磁場外乱の影響を受けずに、慣性センサのみから得られる情報を用いてジャイロセンサのドリフトによる誤差を補正した 3 次元姿勢情報を推定する新しい方法を提案した。さらに、構築した 3 次元姿勢推定法を、スキーマの運動計測に適用することにより、実滑走におけるスキーマの 3 次元身体運動計測を行い、運動学的解析、動力学的解析、生体運動解析を行った。

スキーは広い範囲を高速で滑走することから、スポーツの運動計測に一般的に用いられる DLT 法を適用することが難しい。しかし、本論文にて提案した方法は、計測システムを身体に取り付けることにより、簡易な計測が可能である。また、動的加速度による誤差を補正した正確な姿勢情報を推定でき、運動学的解析だけでなく、動力学的解析や生体運動解析へ拡張可能であることから、スキーマ・ターンのメカニズム解明やスキルの評価等へ利用できる。

次に、本研究で得られた結果について述べる。

第 2 章 慣性センサを用いた身体運動計測における 3 次元姿勢推定法の構築

慣性センサを用いて相対座標系における 3 次元姿勢情報を推定するための方法を構築した。また、本方法の精度を検証するために、並進加速度、磁場外乱が発生する環境下における検証実験を行い、ジャイロセンサのドリフトによる誤差を補正した結果を得ることができた。以上より、提案した 3 次元姿勢推定法の有効性を示した。

第 3 章 慣性センサを用いた実滑走におけるスキーマの 3 次元姿勢計測

実際の雪面において滑走を行うスキーマによる計測実験を行い、第 2 章にて構築した 3 次元姿勢推定法を適用することにより、スキーマの 3 次元姿勢計測を行った。実験の結果、ドリフトによる誤差を補正したスキーマの関節角度を示すことができ、これまでの方法では計測できなかった高速なターンの運動を計測可能であることを示した。

第 4 章 慣性センサを用いたカービングターン，スキッピングターンの運動学的解析

カービングターン，スキッピングターンを行うスキーヤーの計測実験と 3 次元姿勢推定法の適用を行い，スキーヤーの運動計測・解析を行った．さらに，異なる種類のターンにおける 1 ターン（左ターン→右ターン）分の運動に着目した解析を行い，ターン種類の違いによる運動の違いを明らかにした．

第 5 章 慣性・力覚センサシステムを用いたカービングターン，スキッピングターンの運動力学解析

慣性センサを用いた運動計測システムと力センサを用いた雪面反力計測システムを併用した動学的解析法を構築した．カービングターン，スキッピングターンを行うスキーヤーの計測情報に構築した解析法を適用し，ターン中にスキーヤーが発揮した力情報に着目した解析を行った．

第 6 章 実滑走計測によるスキーヤーの下肢筋張力推定と運動解析

スキーヤーの生体内部の筋情報に着目し，スキーヤーの実滑走情報に 3 次元筋骨格モデルを適用することによって下肢筋張力推定を行った．また，下肢筋張力の変化に着目した解析を行い，ターンを行うために重要な筋情報を示した．

本研究において構築した 3 次元姿勢推定法は，動的加速度，磁場外乱による影響を受けず，ドリフトによる誤差を補正した姿勢情報を推定することができる．そのため，地磁気センサの精度が低下する屋内等の環境下や並進加速度が発生する実験環境下においても使用でき，環境に左右されない身体運動計測が可能である．本論文においては，本推定法をスキー・ターンへ適用し，スキーヤーの運動解析を行っているが，本推定法は様々なスポーツにおける身体運動計測へ適用することができる．また，本論文にて構築した 3 次元姿勢推定法，運動解析法を併用することにより，運動学，運動力学，生体運動に基づいた 3 次元身体運動解析を行うことが可能であり，選手のスキル評価や客観的な指導指標の確立，新しいトレーニング法の開発，怪我の予防等への幅広い応用が期待できる．

発表論文一覧

発表論文

1. レフェリー制のある学術雑誌

- (1) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 実滑走計測によるカービングターン・スキッディングターンの運動力学解析に関する研究, スキー研究, 第 10 巻第 1 号, (2014).
掲載決定
- (2) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 永作清, 実滑走計測によるスキーヤーの下肢筋張力推定と運動解析に関する研究, スキー研究, 第 10 巻第 1 号, 27 頁～34 頁 (2013).
- (3) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 実滑走におけるスキーヤーの 3 次元姿勢計測とターンの運動解析に関する研究, スキー研究, 第 10 巻第 1 号, 19 頁～26 頁 (2013).
- (4) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭 慣性センサを用いた身体運動計測における 3 次元姿勢推定法に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 第 79 巻第 803 号, 2351 頁～2361 頁 (2013).
- (5) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子 実滑走計測によるスノーボード・ターンの運動力学解析に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 第 79 巻第 800 号, 897 頁～907 頁 (2013).
- (6) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子 慣性センサ・地磁気センサを用いたスポーツにおける姿勢計測に関する研究, スポーツ産業学研究, 第 22 巻第 2 号, 255 頁～262 頁 (2012).
- (7) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子 スキーヤーの関節角度・滑走速度計測によるスキー・ターンの運動解析に関する研究, スポーツ産業学研究, 第 22 巻第 1 号, 1 頁～8 頁 (2012).

その他（口頭発表，国際会議での発表）

1. 国際会議での発表

- (1) Kondo, A., Doki, H. and Hirose, K., Motion analysis and joint angle measurement of skier gliding on the actual snow field using inertial sensors, The Impact of Technology on Sport V, pp.307-312, 2013.
- (2) Hirose, K., Doki, H. and Kondo, A., Dynamic analysis and motion measurement of ski turns using inertial and force sensors, The Impact of Technology on Sport V, pp.355-360, 2013.
- (3) Kondo, A., Doki, H. and Hirose, K., An estimation method of 3D posture using Quaternion-based Unscented Kalman filter, Proceedings of SICE Annual Conference 2013, pp.78-83, 2013.
- (4) Hirose, K., Doki, H. and Kondo, A., A calibration method of magnetic field sensor for body motion measurement using Extended Kalman filter, Proceedings of SICE Annual Conference 2013, pp.72-77, 2013.
- (5) Kondo, A., Doki, H. and Hirose, K., An attempt of a new motion measurement method for alpine ski turns using inertial sensors, The Engineering of Sport 9, pp.421-426, 2012.
- (6) Hirose, K., Doki, H. and Kondo, A., Dynamic motion analysis of snowboard turns by the measurement of motion and reaction force of snow surface, The Engineering of Sport 9, pp.754-759, 2012.
- (7) Hirose, K., Doki, H. and Kondo, A., A measurement method of the 2DOF joint angles and angular velocities using inertial sensors, Proceedings of SICE Annual Conference 2012, pp.366-371, 2012.

2. 口頭発表

- (1) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 慣性センサを用いた身体運動計測における地磁気センサ校正法に関する研究, 日本機械学会シンポジウム: スポーツアンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013 講演論文集, 212 (2013).
- (2) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, 拡張カルマンフィルタを用いたスキーヤーのばね・減衰係数推定に関する研究, 日本機械学会シンポジウム: スポーツアンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013 講演論文集, 321 (2013).
- (3) 近藤亜希子, 西川太朗, 廣瀬圭, 土岐仁, 小型力センサを用いたスノーボード用雪面反力計測システムの開発に関する研究, 日本スキー学会 2013 年度研究会講演論文集, 26 頁~27 頁 (2013).
- (4) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, 実滑走におけるスキーヤーのばね・減衰係数に関する研究, 日本スキー学会 2013 年度研究会講演論文集, 28 頁~29 頁 (2013).
- (5) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 実滑走計測によるカービングターン, スキッディングターンの運動解析に関する研究, 日本スキー学会第 23 回大会研究発表抄録集, 50 頁~51 頁 (2013).
- (6) 廣瀬圭, 近藤亜希子, 土岐仁, 慣性・力覚センサシステムを用いたスキー・ターンの運動力学解析に関する研究, 日本スキー学会第 23 回大会研究発表抄録集, 52 頁~53 頁 (2013).
- (7) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 慣性センサ・地磁気センサを用いたスポーツにおける運動計測法に関する研究, 日本機械学会スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2012 講演論文集, 29 頁~33 頁 (2012).
- (8) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, 実滑走計測によるスノーボード・ターンの運動力学解析に関する研究, 日本機械学会スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2012 講演論文集, 311 頁~314 頁 (2012).
- (9) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 慣性センサを用いたスキー・ターンの 3 次元姿勢計測に関する研究, 日本スキー学会第 22 回大会研究発表抄録集, 26 頁~27 頁 (2012).

- (10) 土岐仁, 清水史郎, 廣瀬圭, 近藤亜希子, 実滑走計測によるスキーヤーの下肢筋張力推定と運動解析に関する研究, 日本スキー学会第 22 回大会研究発表抄録集, 28 頁～29 頁 (2012).
- (11) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 慣性センサを用いた 3 次元姿勢計測に関する研究, 日本機械学会スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2011 講演論文集, 579 頁～582 頁 (2011).
- (12) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, スキーヤーの関節角度・滑走速度計測を用いたスキー・ターンの運動解析に関する研究, 日本機械学会 スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2011 講演論文集, 90 頁～93 頁 (2011).
- (13) 土岐仁, 近藤亜希子, 廣瀬圭, 慣性センサを用いた関節角度計測に関する研究, 日本機械学会スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2010 講演論文集, 96 頁～99 頁 (2010).
- (14) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 慣性センサ・地磁気センサを用いたスポーツにおける運動計測に関する研究, 日本機械学会東北学生会第 40 回卒業研究発表講演会講演論文集, 176 頁～177 頁 (2010).

謝辞

本研究を行うにあたり，多忙な時間の中，ご指導，ご鞭撻を賜りました，土岐 仁教授に深く感謝の意を表します。

また，本論文の御審査を頂いた上柿 英二教授，神谷 修教授，渋谷 嗣教授，長縄 明大教授に厚く謝意を申しあげます。

さらに，本研究を遂行するにあたり，多大なるご協力を頂きました廣瀬 圭講師，永作 清技術職員，土岐研究室の皆様にご心よりお礼申し上げます。

最後に，博士後期課程に進学するにあたり，温かく見守り，支えてくれた両親，祖母，兄と，応援してくれた叔父，叔母に深く感謝し，謝辞とさせていただきます。